

Ing. Stefan Rossmanith, BSc

Implementierung und Inbetriebnahme eines Generatorschutzes an einem analogen Netzmodell

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur Masterstudium Elektrotechnik - Energietechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer: Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

> Institut für Elektrische Anlagen und Netze Inffeldgasse 18/18010 Graz

> > Graz, 27. September 2022



fotopro

0

Institut für Elektrische Anlage und Netze





Implementierung und Inbetriebnahme eines Generatorschutzes an einem analogen Netzmodell

Eine Masterarbeit von Ing. Stefan Rossmanith, BSc

Betreuer Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

September 2022

Technische Universität Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze Inffeldgasse 18/I 8010 Graz Austria

Institutsleiter Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Betreuer

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

Eine Masterarbeit von Ing. Stefan Rossmanith, BSc

September 2022

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit werden die Entwicklung eines Schutz-Racks und die Implementierung von drei Schutzgeräten in dieses Rack für das Netzmodell der TU Graz umgesetzt.

Des Weiteren werden die Einstellparameter für ein HIPASE-P-Schutzgerät der Firma Andritz für einen Generator im Inselbetrieb bestimmt. Diese werden dann durch Zuschalten von Fehlern für verschiedene Schutzfunktionen getestet und so die zuvor berechneten Parametereinstellungen verifiziert. Für die Ermittlung der Einstellwerte der verschiedenen geprüften Schutzfunktionen wurde als Basis der IEEE Std C37.102[™]-2006 [14] bzw. die HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] verwendet.

Für die Verifizierung wurde ein eigener Laboraufbau erstellt und über eine verstellbare ohmsche Last wurden Fehler zugeschaltet. Die dabei gemessenen Daten, welche direkt vom Schutzgerät entnommen werden konnten, wurden mittels MATLAB grafisch ausgewertet und in der Arbeit analysiert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Schutzgerät wie erwartet funktioniert und bei jedem gezielt geschalteten Fehler eine erfolgreiche Abschaltung stattfand.

Mit dem so aufgebauten Schutz-Rack können Studierende mit Hilfe des TU Graz-Netzmodells im Labor einen praktischen Einblick in das äußerst wichtige Gebiet der Schutztechnik erhalten. Sie entwickeln dabei ein Verständnis für die Vor- und Nachteile der einzelnen Schutzfunktionen. Somit kann man die Anwendung der Grundfragen in einer experimentellen Umgebung überprüfen und damit das Wissen über Schutztechnik vertiefen.

Abstract

In this master's thesis, the development of a protection rack and the implementation of three protection devices in this rack for the power grid model of the University of Technology Graz are realized.

Furthermore, the setting parameters for a HIPASE-P protection device from Andritz for a generator in off-mains operation are determined. These are tested for various protective functions by switching on faults, and the previously calculated parameter settings are thus verified. IEEE Std C37.102TM-2006 [14] or the HIPASE-P protection application description [13] was used as the basis for determining the setting values of the various tested protection functions.

A separate laboratory setup was created for the verification and faults were switched on via an adjustable ohmic load. The measured data, which could be taken directly from the protection device, was evaluated graphically by MATLAB and analyzed in the work. In summary, it can be stated that the protective device works as expected and a successful switch-off took place for each specifically switched fault.

With the protection rack constructed in this way, students can gain a practical insight into the extremely important field of protection technology with the help of the TU Graz power grid model in the laboratory. You will develop an understanding of the advantages and disadvantages of the individual protection functions. In this way you can check the application of the basic questions in an experimental environment and thus deepen your knowledge of protection technology.

Affidavit

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Diplomarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber für die Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit.

Großer Dank gilt auch meinem Betreuer Herrn Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc, dessen Einsatz bei der Betreuung und Ideen für meine Arbeit mir sehr geholfen haben.

Auch möchte ich mich bei Herrn Dipl.- Ing. Herbert Proschek, Hauptprojektleiter der Firma Andritz Hydro für Protection Systems, bedanken. Durch seine Expertise konnte ich einen wertvollen Einblick in die Schutztechnik gewinnen und meine Arbeit praxisorientiert optimieren.

Ich bedanke mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich in schwierigen Phasen des Studiums immer unterstützt haben.

Abkürzungsverzeichnis

Standardisierte Nummerierung und Kennzeichnung der Schutzfunktionen

Die nachfolgenden Nummern und Buchstaben dienen zur Kennzeichnung von Schutzfunktionen in der Schutztechnik und halten sich an den IEEE C37.2 Standard [16] und an den IEEE Std C37.102 [14].

Der Suffix G in den nachfolgenden Funktionsnummern bezieht sich, entgegen einiger Beispiele der Vorlage aus dem IEEE Std C37.102 [14], immer auf den Generator und nicht auf die Erdung.

Nummer	Schutzfunktion
21G	$Unterimpedanz schutz\ /\ Distanz schutz$
24G	Übererregungsschutz (Volt pro Hertz)
27G	Unterspannungsschutz
32R	Wirkleistung Untererfassung
40G	Feld Über-/Untererregungsschutz
46G	Schieflast
49G	Überlastschutz
50G27	Unerwünschte Zuschaltung
50BF	Schaltversager
51G	Überstromschutz
59G	Überspannungsschutz
64G95	Erdschlussfehlerschutz
78G	Außertrittfallschutz
81G.o1	Überfrequenzschutz

81G.u1	Unterfrequenzschutz
87G	Generator Differentialschutz
94E	Mechanischer Fehler, Ausfall der Erregung
94G	Mechanischer Fehler, schnelle Auslösung durch Störung am Generator

Abkürzungen aus den Schemen

Abkürzungen aus der schematischen Vorderansicht des Schaltschranks, Abbildung 2.5

Bezeichnung	Erklärung
DO	Bezeichnung für digitaler Relais-Ausgang des Andritz-Schutzgerätes
DI	Bezeichnung für digitaler Eingang des Andritz-Schutzgerätes
AI	Bezeichnung für analoger Eingang des Andritz- Schutzgerätes
AO	Bezeichnung für analoger Ausgang des Andritz- Schutzgerätes
СТ	Bezeichnung allgemein für Stromwandlereingang
IO_BA	Bezeichnung für digitaler Ausgang des Siemens-Schutzgerätes
IO_BE	Bezeichnung für digitaler Eingang des Siemens-Schutzgerätes
IO_I	Bezeichnung für Stromwandlereingang des Siemens-Schutzgerätes
6I8O K_	Bezeichnung für digitaler Ausgang des Schneider-Schutzgerätes
6I8O U_	Bezeichnung für digitaler Eingang des Schneider-Schutzgerätes

xIE	Bezeichnung für Stromwandlereingang des Schneider-Schutzgerätes
PAS	Bezeichnung für Potentialausgleichsschiene
LWL	Bezeichnung allgemein für Lichtwellenleiter

Abkürzungen der schematischen Ansicht der Rückseite des Schaltschranks, Abbildung 2.6

Bezeichnung	Erklärung
S_A	Schalter für Andritz-Schutzgerät
S_Si	Schalter für Siemens-Schutzgerät
S_Sc	Schalter für Schneider-Schutzgerät
X_A	Anschlussstecker für Mess- und Signalkabel für das Andritz-Schutzgerät
X_Si	Anschlussstecker für Mess- und Signalkabel für das Siemens-Schutzgerät
X_Sc	Anschlussstecker für Mess- und Signalkabel für das Schneider-Schutzgerät
X1Sw	Anschlussstecker für Kommunikation
LWL	Bezeichnung allgemein für Lichtwellenleiter

Abkürzungen in der schematischen Darstellung der Spannungsversorgung, Abbildung 2.7

Bezeichnung	Erklärung
-B1	Not-Aus-Überwachung
-Q1	Hauptschütz

-A1A	Andritz-Schutzgerät
-W1Fr	Anschlüsse Frontplatte für externe Geräte
-A1Si	Siemens-Schutzgerät
-A2Si	Siemens-Merging Unit
-A1Sc	Schneider-Schutzgerät
-S1	Schalter für Versorgung Frontplatte
-S2	Schalter für Schuko-Steckdosen
-T1	Netzteil mit Transformator 110 VDC
-T2	Netzteil mit Transformator 24 VDC
-A1Sw1	Switch Lichtwellenleiter
-A1Sw2	Switch Ethernet
-X1 und -X2	Schuko-Steckdosen

Abkürzungen des schematischen Aufbaues Andritz, Abbildung 2.10

Bezeichnung	Erklärung
-A1A	Andritz-Schutzgerät HIPASE-P
-T1A bis -T9A	Stromwandler für das Andritz-Schutzgerät
-W1A und -W2A	Anschlüsse für die Frontplatte des Schaltschranks
-S1A bis S4A	Schalter für die Strommessungen
LWL	Lichtwellenleiter
CAT 5	Ethernet-Kabel mit Kategorie-5
-T1	Netzteil mit Transformator für 110 VDC
-A1Sw1	Switch Lichtwellenleiter
-A1Sw2	Switch Ethernet
-X1A bis -X6A	Steckverbindungen für Mess- und Signalkabel

Abkürzungen des schematischen Aufbaues Siemens, Abbildung 2.12

Bezeichnung	Erklärung
-A1Si	Siemens-Schutzgerät
-A2Si	Siemens-Merging Unit
-T1Si bis -T12Si	Stromwandler für das Siemens-Schutzgerät
-W1Si und -W2Si	Anschlüsse für die Frontplatte des Schaltschranks
-S1Si bis S5Si	Schalter für die Strommessungen
LWL	Lichtwellenleiter
CAT 5	Ethernet-Kabel mit Kategorie-5

-A1Sw1	Switch Lichtwellenleiter
-A1Sw2	Switch Ethernet
-X1Si bis -X8Si	Steckverbindungen für Mess- und Signalkabel

Abkürzungen des schematischen Aufbaues Schneider, Abbildung 2.14

Bezeichnung	Erklärung
-A1Sc	Schneider-Schutzgerät
-T1Sc bis $-T12Sc$	Stromwandler für das Schneider-Schutzgerät
-W1Sc und -W2Sc	Anschlüsse für die Frontplatte des Schaltschranks
-S1Sc bis S5Sc	Schalter für die Strommessungen
LWL	Lichtwellenleiter
CAT 5	Ethernet-Kabel mit Kategorie-5
-A1Sw1	Switch Lichtwellenleiter
-A1Sw2	Switch Ethernet
-X1Sc bis -X8Sc	Steckverbindungen für Mess- und Signalkabel

Abkürzungen aus der schematischen Darstellung des Laboraufbaus, Abbildung 3.2

Bezeichnung	Erklärung
-A1A	Andritz-Schutzgerät HIPASE-P
CB1 bis CB4	Leistungsschalter
CM1 und CM2	Strommessungen 3-phasig
VM1	Spannungsmessung

GC1	Strommessung 1-phasig
FOC-switch	Lichtwellenleiter-Switch
UT	Blocktransformator

Inhaltsverzeichnis

1	Einle	eitende	Worte	1
	1.1	Allgen	neines	3
2	Entv	wicklun	g des Schutz-Racks	5
	2.1	Schutz	zeräte für das Schutz-Rack	7
		2.1.1	Schutzgerät Andritz	7
		2.1.2	Schutzgerät Siemens	9
		2.1.3	Schutzgerät Schneider	11
	2.2	Aufba	u Schaltschrank	13
		2.2.1	Allgemeines	13
		2.2.2	Vorderseite des Schaltschranks	14
		2.2.3	Rückseite des Schaltschranks	16
	2.3	Spann	ungsversorgung	18
	2.4	Komm	unikationsnetzwerk	20
		2.4.1	Schematischer Aufbau und Kommunikation	20
	2.5	Schem	atischer Aufbau Andritz	21
	2.6	Schem	atischer Aufbau Siemens	24
	2.7	Schem	atischer Aufbau Schneider	27
	2.8	Erstell	len einer Materialliste	30
	2.9	Erstell	len einer Verdrahtungsliste	30
3	Imp	lementi	ierung des Andritz HIPASE-P-Schutzgerätes	31
	3.1	Labora	aufbau	33
		3.1.1	Laboraufbau mit Komponenten des Netzmodells und dem Andritz	
			HIPASE-P	33
	3.2	Gesam	melte Parameter des Laboraufbaus für das HIPASE-P	37
		3.2.1	Parameter des Generators	38
		3.2.2	Parameter der Last	39
		3.2.3	Parameter des Blocktransformators	40
		3.2.4	Grundlegende Berechnungen für die nachfolgende Schutzfunktionen	41
	3.3	Param	eterbestimmung der verifizierbaren Schutzfunktionen	45
		3.3.1	Allgemeines zur Parameterbestimmung der Schutzfunktionen	45
		3.3.2	Schutzfunktion 21G.1, Impedanzschutz	47
			3.3.2.1 Theorie 21G.1	47
			3.3.2.2 Berechnungen 21G.1	48
			3.3.2.3 Parameterwerte 21G.1	49
			3.3.2.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 21G.1	50

3.3.3	Schutzfu	nktion 21G.2, Impedanzschutz	51
	3.3.3.1	Theorie 21G.2	51
	3.3.3.2	Berechnungen 21G.2	51
	3.3.3.3	Parameterwerte 21G.2	52
	3.3.3.4	Grafische Darstellung der Einstellwerte 21G.2	53
3.3.4	Schutzfu	nktion 24G, Übererregung	54
	3.3.4.1	Theorie 24G	54
	3.3.4.2	Berechnungen 24G	54
	3.3.4.3	Parameterwerte 24G	55
3.3.5	Schutzfu	nktion 27G.1, Unterspannungsschutz	56
	3.3.5.1	Theorie 27G.1	56
	3.3.5.2	Berechnungen 27G.1	56
	3.3.5.3	Parameterwerte 27G.1	57
3.3.6	Schutzfu	nktion 27G.2, Unterspannungsschutz	58
	3.3.6.1	Theorie 27G.2	58
	3.3.6.2	Berechnungen 27G.2	58
	3.3.6.3	Parameterwerte 27G.2	59
3.3.7	Schutzfu	nktion 40G.1, Untererregung MHO	60
	3.3.7.1	Theorie 40G.1	60
	3.3.7.2	Berechnungen 40G.1	61
	3.3.7.3	Parameterwerte 40G.1	62
	3.3.7.4	Grafische Darstellung der Einstellwerte 40G.1	63
3.3.8	Schutzfu	nktion 40G.2, Untererregung MHO	64
	3.3.8.1	Theorie 40G.2	64
	3.3.8.2	Berechnungen 40G.2	65
	3.3.8.3	Parameterwerte 40G.2	66
	3.3.8.4	Grafische Darstellung der Einstellwerte 40G.2	67
3.3.9	Schutzfu	nktion 46G, Schieflast	68
	3.3.9.1	Theorie 46G	68
	3.3.9.2	Berechnungen 46G	68
	3.3.9.3	Parameterwerte 46G	69
3.3.10	Schutzfu	nktion 49G, Überlast	70
	3.3.10.1	Theorie 49G	70
	3.3.10.2	Berechnungen 49G	70
	3.3.10.3	Parameterwerte 49G	71
3.3.11	Schutzfu	nktion 50BF, Schaltversager	72
	3.3.11.1	Theorie 50BF	72
	3.3.11.2	Berechnungen 50BF	72
	3.3.11.3	Parameter 50BF	73
3.3.12	Schutzfu	nktion 51G.1, Überstrom 3-phasig	74
	3.3.12.1	Theorie 51G.1	74
	3.3.12.2	Berechnungen 51G.1	74
	3.3.12.3	Parameterwerte 51G.1	75

	3.3.13	Schutzfu	nktion 59G.1, Überspannung	76	
		3.3.13.1	Theorie 59G.1	76	
		3.3.13.2	Berechnungen 59G.1	76	
		3.3.13.3	Parameterwerte 59G.1	77	
	3.3.14	Schutzfu	nktion 59G.2, Überspannung	78	
		3.3.14.1	Theorie 59G.2	78	
		3.3.14.2	Berechnungen 59G.2	78	
		3.3.14.3	Parameterwerte 59G.2	79	
	3.3.15	Schutzfu	nktion 64G95, Überstrom 1 phasig	80	
		3.3.15.1	Theorie 64G95	80	
		3.3.15.2	Berechnungen 64G95	80	
		3.3.15.3	Parameterwerte 64G95	81	
	3.3.16	Schutzfu	nktion 81G.o1, Überfrequenz	82	
		3.3.16.1	Theorie 81G.o1	82	
		3.3.16.2	Berechnungen 81G.o1	82	
		3.3.16.3	Parameterwerte 81G.o1	83	
	3.3.17	Schutzfu	nktion 81G.u1, Unterfrequenz	84	
		3.3.17.1	Theorie 81G.u1	84	
		3.3.17.2	Berechnungen 81G.u1	84	
		3.3.17.3	Parameterwerte 81G.u1	85	
	3.3.18	Schutzfu	nktion 87G, Generator-Differential	86	
		3.3.18.1	Theorie 87G	86	
		3.3.18.2	Berechnungen 87G	88	
		3.3.18.3	Parameterwerte 87G	88	
	3.3.19	Schutzfu	nktion 94E, Mechanischer Fehler	90	
		3.3.19.1	Theorie 94E	90	
		3.3.19.2	Berechnungen 94E	90	
		3.3.19.3	Parameterwerte 94E	90	
	3.3.20	Schutzfu	nktion 94G, Mechanischer Fehler schnell	91	
		3.3.20.1	Theorie 94G	91	
		3.3.20.2	Berechnungen 94G	91	
		3.3.20.3	Parameterwerte 94G	91	
3.4	Param	Parameterbestimmung der nicht verifizierbaren Schutzfunktionen 92			
	3.4.1	Allgemei	nes zur Parameterbestimmung der nicht verifizierbaren		
		Schutzfu	nktionen	92	
	3.4.2	Schutzfu	nktion 32R, Wirkleistungs Untererfassung	93	
		3.4.2.1	Theorie 32R	93	
		3.4.2.2	Berechnungen 32R	93	
		3.4.2.3	Parameterwerte 32R	94	
	3.4.3	Schutzfu	nktion 50G/27, Unerwünschte Zuschaltung	95	
		3.4.3.1	Theorie 50G/27	95	
		3.4.3.2	Berechnungen $50G/27$	95	
		3.4.3.3	Parameterwerte $50G/27$	96	

		3.4.4	Parameter der Schutzfunktion 51G.2, Überstrom 3-phasig	97
			3.4.4.1 Theorie 51G.2	97
			3.4.4.2 Berechnungen 51G.2	97
			3.4.4.3 Parameterwerte 51G.2	98
		3.4.5	Schutzfunktion 78G, Außertrittfall	99
			3.4.5.1 Theorie 78G	99
			3.4.5.2 Berechnungen 78G	100
			3.4.5.3 Parameterwerte 78G	102
			3.4.5.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 78G	103
		3.4.6	Parameter der Schutzfunktion Neutral End	104
		3.4.7	Theorie Neutral End	104
			3.4.7.1 Berechnungen Neutral End	104
			3.4.7.2 Parameterwerte Neutral End	105
	3.5	Bedien	noberfläche Andritz HIPASE-P	106
	3.6	Zuordi	nung der Schutzfunktionen am HIPASE-P	107
л	Lab	oro	Andritz HIDASE D	100
4			aning	111
	4.1		rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 21C-1. Impedenzschutz	112
	4.2	A 2 1	Schaltplan des Laboraufhaus mit Zuschaltung des Fehlers	112
		7.2.1	4.2.1.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten	112
		422	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	112
		4.2.2	Erkenntnis	113
	43	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 21G 2. Impedanzschutz	119
	1.0	4.3.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	119
		4.3.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	119
		4.3.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	120
		4.3.4	Erkenntnis	120
	4.4	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 24G. Übererregung .	126
		4.4.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	126
			4.4.1.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten	126
		4.4.2	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	127
		4.4.3	Erkenntnis	127
	4.5	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 27G.1, Unterspannungs-	
		schutz	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	131
		4.5.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	131
			4.5.1.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten	131
		4.5.2	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	132
		4.5.3	Erkenntnis	132
	4.6	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 27G.2, Unterspannungs-	
		schutz	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	136
			4.6.0.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	136
		4.6.1	Berechnete Last nach dem Zuschalten	136

	4.6.2	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	137
	4.6.3	Erkenntnis	137
4.7	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 32R, Wirkleistungs	
	Untere	erfassung	141
4.8	Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 40G.1, Untererregung		
	MHO		142
	4.8.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	142
	4.8.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	142
	4.8.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	143
	4.8.4	Erkenntnis	143
4.9	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 40G.2, Untererregung	
	MHO		149
	4.9.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	149
	4.9.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	149
	4.9.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	150
	4.9.4	Erkenntnis	150
4.10	Auswe	ertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 46G, Schieflast, 1-	
	phasig	belastet 	156
	4.10.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	156
	4.10.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	156
	4.10.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	157
	4.10.4	Erkenntnis	157
4.11	Auswe	ertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 46G, Schieflast, Dreh-	
	richtur	ng der Turbine	162
	4.11.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	162
	4.11.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	162
	4.11.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	163
	4.11.4	Erkenntnis	163
4.12	Auswe	ertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 49G, Überlast	167
	4.12.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	167
	4.12.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	167
	4.12.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	168
	4.12.4	Erkenntnis	168
4.13	Auswe	ertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 50BF, Schaltversager .	173
	4.13.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	173
	4.13.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	173
	4.13.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	174
	4.13.4	Erkenntnis	174
4.14	Auswe	ertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 50G/27, Unerwünsch-	
	te Zus	chaltung	179
4.15	Auswe	ertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.1, Überstrom, 1-	
	phasig	er Kurzschluss	180
	4.15.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	180

	4.15.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	180
	4.15.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	181
	4.15.4	Erkenntnis	181
4.16	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.1, Überstrom, 2-	
	phasig	er Kurzschluss	185
	4.16.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	185
	4.16.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	185
	4.16.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	185
	4.16.4	Erkenntnis	185
4.17	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.1, Überstrom, 3-	
	phasig	er Kurzschluss	190
	4.17.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	190
	4.17.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	190
	4.17.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	190
	4.17.4	Erkenntnis	190
4.18	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.2, Überstrom	195
4.19	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 59G.1, Überspannung	196
	4.19.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	196
	4.19.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	196
	4.19.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	197
	4.19.4	Erkenntnis	197
4.20	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 59G.2, Überspannung	201
	4.20.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers $\ .\ .$.	201
	4.20.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	201
	4.20.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	202
	4.20.4	$Erkenntnis . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ .$	202
4.21	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 64G95, Überstrom 1-	
	phasig		206
	4.21.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers $\ .\ .\ .$	206
	4.21.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	206
	4.21.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	207
	4.21.4	Erkenntnis	207
4.22	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 78G, Außertrittfall $\ .$.	211
4.23	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 81G.01, Überfrequenz	212
	4.23.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers $\ .\ .\ .$	212
	4.23.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	212
	4.23.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	213
	4.23.4	Erkenntnis	213
4.24	Auswe	rtung der Messergebnisse der Schutzfunktion 81G.u1, Unterfrequenz	217
	4.24.1	Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers $\ .\ .\ .$.	217
	4.24.2	Berechnete Last nach dem Zuschalten	217
	4.24.3	Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	218
	4.24.4	Erkenntnis	218

	4.25	Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 87G, Generator-Differentia		
		Erdschluss	222	
		4.25.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers $\ .\ .\ .$	222	
		4.25.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten	222	
		4.25.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	223	
		1.25.4 Erkenntnis	223	
	4.26	Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 87G, Generator-Differen	tial,	
		Kurzschluss	229	
		4.26.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	229	
		4.26.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten	229	
		4.26.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	230	
		1.26.4 Erkenntnis	230	
4.27 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 94E, Mecha				
		fehler	236	
		4.27.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers	236	
		1.27.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten	236	
		1.27.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	237	
	1 90	4.27.4 Erkenntnis	237	
	4.20	Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 94G, Mechanischer	941	
		remei schnen	$\frac{241}{941}$	
		1.28.2 Borochuoto Last nach dom Zuschalton	241 9/1	
		1.28.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs	241	
		1.28.4 Erkenntnis	242	
	4.29	Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion Neutral End	246	
5	Erke	ntnisse und Zusammenfassung	247	
	5.1	Erkenntnisse	249	
	5.2	Zusammenfassung	252	
6	Auch	ick	253	
0	6.1	Allgemeines	255	
_			050	
1	Abb	dungsverzeichnis	259	
8	Tabe	lenverzeichnis	267	
9	Liter	turverzeichnis	271	
10	Anh	ng	275	
	10.1	_ Geräteliste für Laboraufbau	277	
	10.2	MATLAB CODE	278	

1 Einleitende Worte

1.1 Allgemeines

In dieser Masterarbeit sollen die Entwicklung eines neuen Schutz-Racks und die Implementierung von drei Schutzgeräten in dieses Rack für das Netzmodell der TU Graz umgesetzt werden. Eines dieser Schutzgeräte wurde von der Firma ANDRITZ HYDRO GmbH zur Verfügung gestellt. Bei dem Modell handelt es sich um eines aus der HIPASE-P-Reihe. Ein weiteres Gerät wurde von Schneider bereitgestellt, nämlich das Easergy MiCOM P634, und von Siemens kommen das Schutzgerät SIPROTEC 7UT85 und die Merging Unit SIPROTEC 6MU85 als Kombination für eine Schutzeinheit. Diese drei Schutzgeräte sind für den Schutz von Generatoren, Transformatoren, Leitungen und einige weitere Systeme entwickelt worden.

Das Schutz-Rack soll so entwickelt werden, dass es in das aktuelle Netzmodell leicht implementiert werden kann. Es soll steckbar mit den Komponenten des Modells verbunden werden können und mobil sein, damit es überall im Labor eingebunden werden kann. Auch aktuelle Sicherheitsstandards und die Einbindung in das Not-Aus-System des Labors mussten berücksichtigt werden.

Da die Möglichkeiten im Labor des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze, in welchem sich das Netzmodell mit seinen diversen modularen Komponenten befindet, den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit überschreiten, wurde festgelegt, dass nur ein kleines Netz im Inselbetrieb mit einem Generator, einem Blocktransformator, sehr kurzen Leitungen und einem rein ohmschen Verbraucher für die Verifizierung zum Einsatz kommen. Für die gezielte Zuschaltung der Fehler im Inselbetrieb mit Nennlast wurde ein einstellbarer ohmscher Leistungswiderstand verwendet.

Des Weiteren sollen die Parameter des Andritz-Schutzgerätes für das zu schützende Objekt im Netzmodell bestimmt und durch Zuschalten von Fehlern die einzelnen Schutzfunktionen getestet und ihre Parametereinstellungen verifiziert werden. Die Berechnung der Schutzparameter für den Generator erfolgt über Excel und wurde so erstellt, dass mit Hilfe dieser Datei auch für andere Schutzobjekte die Schutzparameter bestimmt werden können. Zusätzlich wurden für ein paar Schutzfunktionen grafische Darstellungen im Impedanzdiagramm angefertigt, um Fehler in der Berechnung sofort zu erkennen. Es kommen 24 Schutzfunktionen zum Schutz des Generators bzw. als Zusatzschutz für andere Komponenten im Netz des Inselbetriebs zum Einsatz und diese werden mit 23 zugeschalteten Fehlern verifiziert, wobei ein paar Schutzfunktionen mit diesem Laboraufbau nicht verifizierbar sind und andere mit mehreren Fehlern getestet wurden. Viele dieser Schutzfunktionen kommen redundant zum Einsatz, was eine höhere Sicherheit gewährleistet.

Drei der Schutzfunktionen sind nicht verifizierbar, weil diese eine Anbindung an ein starres Netz benötigen. In dieser Arbeit wird allerdings im Inselbetrieb operiert. Eine weitere hingegen ist eine rein mathematische Funktion und dient nur zur internen Vorberechnung, um Werte für andere Schutzfunktionen zur Verfügung zu stellen. Die Stufe 2 einer bestimmten Schutzfunktion, welche in dieser Arbeit als eigene Schutzfunktion angeführt wird, hat das Problem, dass die berechneten Werte der Stufe 1 und Stufe 2 so nah aneinander liegen, dass hier der selbe Einstellwert ermittelt wurde und damit eine Verifizierung der Stufe 2 nicht möglich war.

Im Andritz HIPASE-P können die Schutzfunktionen in Stufen unterteilt werden, was den Vorteil bringt, dass verschiedene Anregewerte und Auslösezeiten für eine Schutzfunktion eingestellt werden können. Da diese Stufe in der Software nur einen weiteren Reiter mit den exakt selben Einstellmöglichkeiten öffnet, kann eine Stufe wie eine weitere Einbindung der selben Funktion gesehen werden. Daher werden in dieser Arbeit diese Stufen als Schutzfunktionen mit zusätzlichem Index dargestellt so wie es auch in der Software umgesetzt wurde.

Der Sternpunkt des Generators wird starr geerdet, was eigentlich, laut dem Experten der Firma Andritz, für reale Systeme untypisch ist. Über diese starre Verbindung wird im Fehlerfalle der Strom über Erde mittels Schutzgerät gemessen.

Zweck dieses Schutz-Racks ist es, dass Studenten mit Hilfe des TU Graz-Netzmodells einen Einblick in die Schutztechnik erhalten, ein Verständnis für die Vor- und Nachteile der einzelnen Schutzfunktionen entwickeln und ein Gespür für die Anwendung in den verschiedenen Netzarten erhalten.

Bei der Bestimmung der einzelnen Parameter der Schutzfunktionen wurde sich großteils an die NORM des IEEE Std C37.102[™]-2006 [14] bzw. an die HIPASE-P- Applikationsbeschreibung [13] gehalten. Auch weitere Literatur wurde benötigt, um sich mit der grundlegenden und aktuellen Thematik in der Schutztechnik auseinander zu setzen. Diese ist im Literaturverzeichnis angeführt.

2 Entwicklung des Schutz-Racks

2.1 Schutzgeräte für das Schutz-Rack

2.1.1 Schutzgerät Andritz

Das Schutzgerät von Andritz mit der Typenbezeichnung HIPASE-P MEDIUM GGP-002–/B1/F–R-P-TXK ist ein Multifunktionsschutzgerät zum Schutz von Generatoren und als zusätzlicher Schutz von Transformatoren, Kabeln oder Leitungen in Mittel-, Hochund Höchstspannungsebenen entwickelt worden. Die Werte der nachfolgenden Angaben sind Effektivwerte und wurden den Betriebsanleitungen HIPASE-P-Datenblätter [11] und HIPASE-P-Applikationsbeschreibung [13] entnommen.

Dieses Gerät verfügt über zwei redundante Eingänge der Versorgung mit einer Nennspannung von 110 bis 220 VDC. Der Spannungsbereich für den Betrieb des Gerätes umfasst 90 VDC bis 250 VDC. Der Eigenverbrauch beträgt 8 W und eine maximale Leistungsaufnahme von 78 W ist möglich.

Es hat 12 analoge Stromeingänge mit einem Messbereich von 0 bis 1 A oder 0 bis 5 A. Dieser Eingang ist dauerhaft für den 4-fachen Nennstrom des jeweiligen Messbereiches ausgelegt und kann für eine Sekunde mit dem 100-fachen belastet werden.

Das HIPASE-P besitzt 8 analoge Spannungseingänge, welche einen Messbereich von 0 bis 177 V haben. Als Nennspannung für die Messeingänge wird eine verkettete Spannung von 100 V, 110 V, 115 V und 120 V angegeben. Dauerhaft kann der Spannungseingang mit dem Doppelten der maximalen Nennspannung belastet werden. Die Spannungsfestigkeit aller Eingänge gegen das Gehäuse beträgt 2,2 kVAC.

Mit 8 digitalen Eingängen und 24 digitalen Ausgängen lassen sich Sensorik und Aktorik des zu schützenden Systems mit dem HIPASE-P verknüpfen. Durch die Unterstützung der nachfolgend aufgezählten internationalen Kommunikationsprotokolle lässt sich das Schutzgerät mit Prozessleitsystemen verbinden und es ist damit eine Kommunikation in zwei Richtungen möglich.

- IEC 61850 Ed 2.0
- IEC 60870-5-104 Ed 2.0
- IEC 60870-5-103
- ModBus TCP



 $\label{eq:Quelle: https://www.andritz.com} Quelle: https://www.andritz.com$

Abbildung 2.1: HIPASE-P MEDIUM GGP-002-/B1/F-R-P-TXK

2.1.2 Schutzgerät Siemens

Das Schutzgerät von Siemens mit der Typenbezeichnung SIPROTEC 7UT85 ist ein Multifunktionsschutzgerät zum Schutz von Transformatoren und als zusätzlicher Schutz von Kabeln und Leitungen in Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsebenen entwickelt worden. Die Merging Unit SIPROTEC 7MU85 ist für den Einsatz in der Peripherie gedacht und soll unnötig lange Verdrahtungen zwischen Wandler und Schutzgerät vermeiden. Sie wird vor Ort eingesetzt, digitalisiert die Analogwerte und sendet die Daten per Lichtwellenleiter z.b. an das SIPROTEC 7UT85-Schutzgerät, welches sich an einem zentralen Ort befindet. Die Werte der nachfolgenden Angaben sind Effektivwerte und wurden den Betriebsanleitungen von Siemens SIPROTEC 7UT85 [19] und Siemens SIPROTEC 6MU85 [18] entnommen.

Das 7UT85 mit den Baugruppen IO203, IO214, PS201 bzw. das 6MU85 mit den Baugruppen IO202, PS201 benötigen als Versorgung eine Nennspannung von 48 bis 300 VDC oder 80 bis 265 VAC. Der Eigenverbrauch pro Gerät beträgt 7 W und eine maximale Leistungsaufnahme von 13 W ist möglich.

Zusammen haben sie 16 analoge Stromeingänge mit einem Messbereich von 0 bis 1 A oder 0 bis 5 A. Dieser Eingang ist dauerhaft für den 4-fachen Nennstrom des jeweiligen Messbereiches ausgelegt und kann für eine Sekunde mit dem 100-fachen belastet werden.

Das 7UT85 und das 7MU85 besitzen zusammen 8 analoge Spannungseingänge, welche einen Messbereich von 0 bis 200 V haben. Als Nennspannung wird die Außenleiterspannung von 100 V, 110 V, 115 V und 120 V angegeben. Dauerhaft kann der Spannungseingang mit 230 VAC belastet werden. Die Spannungsfestigkeit aller Eingänge gegen das Gehäuse beträgt 3,5 kVDC.

Mit 20 digitalen Eingängen und 21 digitalen Ausgängen der beiden Geräte lassen sich Sensorik und Aktorik des zu schützenden Systems mit den Siemens-Geräten verknüpfen. Durch die Unterstützung der nachfolgend aufgezählten internationalen Kommunikationsprotokolle lässt sich das Schutzgerät mit Prozessleitsystemen verbinden und es ist damit eine Kommunikation in zwei Richtungen möglich.

- IEC 61850-8-1, IEC 61850-9-2 Client
- IEC 60870-5-103, IEC 60870-5-104 Ed 2.0
- DNP3 seriell und TCP
- ModBus TCP
- PROFINET IO, PROFINET IO S2 Redundanz



 $Quelle: \ https://new.siemens.com$

Abbildung 2.2: SIPROTEC 7UT85



Quelle: https://new.siemens.com

Abbildung 2.3: SIPROTEC 7MU85
2.1.3 Schutzgerät Schneider

Das Schutzgerät von Schneider mit der Typenbezeichnung Easergy MiCOM P634-749911M0-312-413-661-702-924-801 ist ein Multifunktionsschutzgerät zum Schutz von Transformatoren und als zusätzlicher Schutz von Kabeln oder Leitungen in Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsebenen entwickelt worden. Die Werte der nachfolgenden Angaben sind Effektivwerte und wurden der Betriebsanleitung [3] entnommen.

Dieses Gerät benötigt als Versorgung eine Nennspannung von 60 bis 250 VDC bzw. 100 bis 230 VAC. Es besitzt eine maximale Leistungsaufnahme von 42,3 W. Es hat 15 analoge Stromeingänge mit einem Messbereich von 0 bis 1 A oder 0 bis 5 A. Dieser Eingang ist dauerhaft für den 4-fachen Nennstrom des jeweiligen Messbereiches ausgelegt und kann für eine Sekunde mit dem 100-fachen belastet werden.

Das Easergy MiCOM P634 besitzt 4 analoge Spannungseingänge, welche einen Messbereich von 0 bis 200 V haben. Als Nennspannung wird die Außenleiterspannung von 100 V, 110 V, 115 V und 120 V angegeben. Dauerhaft kann der Spannungseingang mit 230 V belastet werden. Die Spannungsfestigkeit aller Eingänge gegen das Gehäuse beträgt 2 kVAC.

Mit 12 digitalen Eingängen und 20 digitalen Ausgängen lassen sich Sensorik und Aktorik des zu schützenden Systems mit dem HIPASE-P verknüpfen. Durch die Unterstützung der nachfolgend aufgezählten internationalen Kommunikationsprotokolle lässt sich das Schutzgerät mit Prozessleitsystemen verbinden und es ist damit eine Kommunikation in zwei Richtungen möglich.

- IEC 61850 Ed 2.0
- IEC 60870-5-104 Ed 2.0
- IEC 60870-5-103
- ModBus TCP



Quelle: https://www.se.com

Abbildung 2.4: Easergy MiCOM P634-749911M0-312-413-661-702-924-801

2.2 Aufbau Schaltschrank

2.2.1 Allgemeines

Der Schaltschrank des Schutz-Racks soll die Schutzgeräte aller drei Hersteller beinhalten. Auf der Vorderseite, wie in Abbildung 2.5 zu sehen, sollen die Bedienterminals der Schutzgeräte, die Buchsen für die Federstecker sowie sämtliche Schalter, Steckdosen und Verbindungsmöglichkeiten für externe Geräte montiert sein. Auf der Rückseite, wie in Abbildung 2.6 ersichtlich, sollen die Steckverbindungen für das TU Graz-Netzmodell, die dafür vorgesehen Schalter, die Steckverbindung für die Stromversorgung und die Verbindungsmöglichkeiten für die Kommunikation bzw. das GPS platziert sein.

Damit dieses Rack betrieben werden kann, muss es mit dem Not-Aus-Kreis des Labors verbunden werden. Ohne eine Einbindung in diesen Kreis darf das Schutz-Rack nicht in Betrieb gehen können. Dafür wurde in das Konzept für die Versorgung die Einbindung des Not-Aus-Kreises berücksichtigt. Wie in Abbildung 2.7 zu erkennen ist, sind der Not-Aus- und der Leistungsschalter über eine Signalleitung verbunden. Die Freigabe für den Leistungsschalter erfolgt erst nach Verbinden des Not-Aus-Schalters vom Schaltschrank mit dem Not-Aus-Kreis des Labors.

Von jedem Schutzgerät ist der dritte analoge Stromeingang mit einem Wechselschalter verbunden. Mit diesem Schalter ist es möglich, zwischen den Sicherheitsbuchsen an der Frontplatte und dem Summenstrom der Stromwandler umzuschalten, wie in Abbildung 2.10, Abbildung 2.12 und Abbildung 2.14 dargestellt. Je nach Bedarf kann der Summenstrom der Wandler oder ein externer Strom über die Sicherheitsbuchsen der Frontplatte gemessen werden.

Die Spannungsmessung erfolgt ohne Spannungswandler und wird auf der Primärseite der Stromwandler abgegriffen. Hierfür werden immer die Stromwandler des Drehstromsystems verwendet, welche zur ersten Strommessung gehören.

Der ganze Schaltschrank soll jederzeit problemlos den Standort im Labor wechseln können und wurde deshalb mit Rollen ausgestattet.

2.2.2 Vorderseite des Schaltschranks

Auf der Vorderseite des Schutz-Racks sind alle zusätzlichen digitalen bzw. analogen Ein-Ausgänge, welche nicht für die Steckverbindungen an der Rückwand benötigt werden, auf Sicherheitsbuchsen an der Frontplatte ausgeführt. Diese sind farblich gekennzeichnet. Digitale Ausgänge sind Relaiskontakte und haben keine Polarität, deshalb ist hier für die Buchsen die gewählte Farbgebung schwarz. Bei den digitalen bzw. analogen Eingänge existiert eine Polarität und diese muss auch beachtet werden, auch wenn viele Hersteller bereits einen Verpolungsschutz in ihren Geräten integriert haben. Es werden rote Sicherheitsbuchsen für das positive Potential und blaue für das negative Potential verwendet.

Für die Versorgung von externen Geräten wurden über Sicherheitsbuchsen zwei schaltbare Anschlussmöglichkeiten für Systeme mit 110 VDC-Versorgung und drei Anschlussmöglichkeiten für Systeme mit 24 VDC-Versorgung auf die Frontplatte ausgeführt. Da laut ÖVE EN NORM 8101 [4] eine Spannung von weniger als 90 VDC zur Schutzkleinspannung zählt, gibt es auch eine Steckmöglichkeit für eine Potentialausgleichsschiene (PAS) an der Frontplatte. Weil das 110 VDC-Netzteil einen Sicherheitstransformator beinhaltet, kommt hier die Schutztrennung für ein bzw. mehrere Geräte zu tragen. Des Weiteren werden noch sechs Steckdosen mit Netzspannung für die Versorgung zur Verfügung gestellt, wobei zwei davon schaltbar sind.

Ganz unten im Schutz-Rack ist die Kommunikation verbaut. Hier sind an der Frontplatte jeweils zwei RJ45-Buchsen für eine Ethernet-Anbindung und zwei LWL-Buchsen für eine Anschlussmöglichkeit für Lichtwellenleiter platziert. Diese Anschlüsse sind für die Kommunikation mit einem Laptop oder anderen Programmiergeräten gedacht, um die Schutzgeräte mit Hilfe dieser zu konfigurieren bzw. Daten zu analysieren.



Abbildung 2.5: Vorderansicht des Schaltschranks, schematische Darstellung

2.2.3 Rückseite des Schaltschranks

Auf der Rückwand des Schutz-Racks sind die Steckverbindungen und Schalter angebracht, wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Diese dienen dazu, die Mess- und Steuerleitung von den Schutzgeräten mit den Komponenten des TU Graz-Netzmodells zu verbinden. Die Schalter auf der Rückseite geben die Möglichkeit, vom normalen Messbetrieb mit dem Netzmodell zu einem Prüfbetrieb der Schutzgeräte umzuschalten. Dabei werden die Rückführungen der Messleitungen, die vom Messeingang kommen, nach dem Schaltkontakt gebügelt und auf einen eigenen Pin der Steckverbindung gelegt. Dadurch ist eine benötigte Rückleitung für ein Prüfgerät wie den OMICRON CMC, welches über einen eigens angefertigten Adapter für das Schutz-Rack verbunden wird, vorhanden.

Die größeren eckigen Steckverbinder mit den Bezeichnungen -X1A bis -X3A, -X1Si bis -X4Si und -X1Sc bis -X4Sc sind Harting-Buchsen vom Typ Han 3A-AGG-QB (GRAU) KU und verbinden die Messeingänge mit dem Netzmodell. Die kleineren runden Steckverbindungen mit den Bezeichnungen -X4A bis -X6A, -X5Si bis -X8Si und -X5Sc bis -X8Sc sind Harting-Buchsen vom Typ M12 PFT A-cod st/- f/, sie verbinden die Steuerleitungen der Schutzgeräte mit den Leistungsschalter des Netzmodells. Für jeden Messeingang des Schutzgerätes gibt es eine Harting Han 3A und für jede Steuermöglichkeit eines Leistungsschalter gibt es eine Harting M12 PFT-Steckverbindung.

Im unteren Bereich des Schrankes, auf der Rückseite, befinden sich wieder die Buchsen für die Kommunikation: Zwei RJ45-Buchsen für eine Ethernet-Anbindung und zwei LWL-Buchsen für eine Anschlussmöglichkeit für Lichtwellenleiter. Zusätzlich sind noch vier BNC-Buchsen montiert. An einem davon wird z.B. die GPS-Antenne angeschlossen, wie in Abbildung 2.8 ersichtlich.

Im unteren Bereich des Schaltschranks, auf der rechten Seite, befindet sich die Buchse für den Netzstecker und damit die Spannungsversorgung vom Netz. Hierfür ist ein herkömmlicher Kaltgerätestecker vorgesehen.



Abbildung 2.6: Ansicht der Rückseite des Schaltschranks, schematische Darstellung

2.3 Spannungsversorgung

In Abbildung 2.7 wird das Konzept für die Versorgung der einzelnen Komponenten im Schaltschrank dargestellt und zeigt einen Entwurf für die Anbindung des Not-Aus-Systems. Die Spannungsversorgung des Schaltschranks erfolgt extern und benötigt eine 230 V / 50 Hz-Quelle, welche das Netz bietet. Diese Versorgung wird über eine steckbare Verbindung sichergestellt und ist über ein Kaltgerätekabel mit jeder herkömmlichen Schukosteckdose kompatibel.

Der Schaltschrank darf erst nach Freigabe durch das Not-Aus-System die restlichen Komponenten im Schutz-Rack versorgen. Diese Freigabe erfolgt, sobald das Rack mit dem Not-Aus-System des Labors verbunden ist. In weiterer Folge wird ein Leistungsschalter bzw. Leistungsschütz geschaltet und sämtliche Komponenten im Schaltschrank stehen unter Spannung.

Für die Versorgung der internen sowie externen Geräte gibt es einen 230 VAC, einen 110 VDC und einen 24 VDC-Kreis im Schutz-Rack. Die Gleichspannungsquellen sind entsprechende Netzteile mit Sicherheitstransformator, Spannungsregelung und Kurzschlussfestigkeit.

Da laut ÖVE EN NORM 8101 [4] eine Spannung von weniger als 90 VDC zur Schutzkleinspannung zählt, gibt es auch eine Steckmöglichkeit für eine Potentialausgleichsschiene (PAS) an der Frontplatte. Weil das 110 VDC-Netzteil einen Sicherheitstransformator beinhaltet, kommt hier die Schutztrennung für ein bzw. mehrere Geräte zu tragen und bei der Verwendung eines zweiten 110 VDC-Gerätes muss ein Potentialausgleich gelegt werden.





2.4 Kommunikationsnetzwerk

2.4.1 Schematischer Aufbau und Kommunikation

In Abbildung 2.8 ist der schematische Aufbau der Netzwerkstruktur im Schutz-Rack dargestellt. Für das Schutz-Rack wurden sämtliche Hardwareschnittstellen der Schutzgeräte mit anderen Komponenten über zwei Switches verbunden. Somit ist die Hardware vorbereitet und es kann nach der Konfiguration eine Kommunikation zwischen den internen bzw. externen Schutzgeräten, einem Programmiergerät oder mit einem Leitsystem stattfinden.

Die Kommunikation zwischen den Schutzgeräten nach IEC 61850 - STATIONSBUS - PROTOKOLL wird in der Bachelorarbeit von Herrn Maximilian Brestan behandelt. Konkret beschäftigt sich seine Arbeit mit der Kommunikation nach IEC 61850 zwischen dem Schutzgerät und der Merging Unit von Siemens.



Quelle: https: Bachelorarbeit Maximilian Brestan

Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau der Netzwerkstruktur

2.5 Schematischer Aufbau Andritz

In Abbildung 2.10 ist der Aufbau bzw. die Verschaltung für das Schutzgerät von Andritz mit den Komponenten im und auf dem Schaltschrank schematisch dargestellt. Zu sehen ist das Andritz HIPASE-P, welches vom Netzteil -T1 versorgt wird.

Über die Steckverbindungen -X1A bis -X3A wird das Schutzgerät mit dem Hauptstromkreis des TU Graz-Netzmodells verbunden. Von diesen Steckverbindungen werden die 3-phasigen Leiter zu den Stromwandlern -T1A bis -T9A geführt und wieder zu den Steckverbindungen zurück geleitet. Ein weiterer Leiter, der von diesen Steckverbindungen kommt, ist die Verbindung mit dem Potentialausgleich des Netzmodells und diese wird auf einen eigenen Potentialausgleich im Schutz-Rack gelegt. Dieser Potentialausgleich ist nicht mit dem Potentialausgleich des Netzteils oder dem Potential der PEN-Schiene am Hausanschlusskasten verbunden.

Über die Schalter -S1A bis -S3A kann zwischen normalem Betrieb oder einem Prüfbetrieb, bei dem das OMICRON CMC angeschlossen wird, umgeschaltet werden.

Die Sekundärseite der Stromwandler wird mit den Messeingängen des Schutzgerätes und die Primärseite mit den zuvor beschriebenen Steckverbindungen des Hauptstromkreises des Netzmodells verbunden. Durch die Zusammenschaltung der Sekundärseiten von drei Stromwandlern und drei Messeingängen aus einem Drehstromzweig zu jeweils einem Sternpunkt kann über die Verbindung der beiden Sternpunkte der Summenstrom ermittelt werden. (Abbildung 2.9)

Dieser wird ebenfalls zu einem Stromeingang am Schutzgerät gelegt. Bei der Summenstrommessung des dritten Drehstromzweigs, der von der Steckverbindung -X3A kommt, ist ein zusätzlicher Schalter -S4A eingebaut. Dieser Schalter ermöglicht das Umschalten der Summenstrommessung vom Stromwandler zu einer externen Quelle. Somit können auch z.B Erdströme aus dem Netzmodell aufgenommen werden.

Die Spannungsmessung für das Schutzgerät erfolgt immer über das erste Drehstromsystem, welches von der Steckverbindung -X1A kommt und auf der Primärseite des Stromwandler abgegriffen wird.

Damit das Schutzgerät die Leistungsschalter des Netzmodells ansteuern kann, gibt es die Steckverbindungen -X4A bis -X6A. Diese führen auch Rückmeldungen der Schalterposition mit, wodurch über diese Steckverbindungen digitale Ein- wie Ausgangssignale geleitet werden. Falls noch zusätzliche Signale für das Netzmodells benötigt werden, sind weitere digitale und analoge Ein-Ausgänge vom Schutzgerät an die Frontplatte des Schaltschranks verlegt.

Für die Kommunikation mit anderen Schutzgeräten bzw. mit Programmiergeräten ist das Schutzgerät mit zwei Switches verbunden. Ein Switch ist ein Lichtwellenleiter-Switch



Abbildung 2.9: Allgemeine Verschaltung der Sternpunkte zur Summenstrommessung

(-A1Sw1) und stellt die sichere und schnelle Kommunikation mit anderen Schutzgeräten her. Auch über sehr große Distanzen werden diese Signale sicher und schnell übermittelt. Der zweite Switch (-A1Sw2) ist ein Ethernet-Switch und verbindet das Schutzgerät mit einem Laptop, einem PC oder einem Leitsystem. Es soll den ständigen Zugriff auf die Geräte für deren Datenabfrage oder Konfiguration gewährleisten.



Abbildung 2.10: Darstellung schematischer Aufbau Andritz

23

2.6 Schematischer Aufbau Siemens

In Abbildung 2.12 ist der Aufbau bzw. die Verschaltung für das Schutzgerät von Siemens mit den Komponenten im und auf dem Schaltschrank schematisch dargestellt. Zu sehen sind das SIPROTEC 7UT85-Schutzgerät und die SIPROTEC 7MU85-Merging Unit, welche mit Netzspannung versorgt werden.

Über die Steckverbindungen -X1Si bis -X4Si wird das Schutzgerät mit dem Hauptstromkreis des TU Graz-Netzmodells verbunden. Von diesen Steckverbindungen werden die 3-phasigen Leiter zu den Stromwandlern -T1Si bis -T12Si geführt und wieder zu den Steckverbindungen zurück geleitet. Ein weiterer Leiter, der von diesen Steckverbindungen kommt, ist die Verbindung mit dem Potentialausgleich des Netzmodells und diese wird auf einen eigenen Potentialausgleich im Schutz-Rack gelegt. Dieser Potentialausgleich ist nicht mit dem Potentialausgleich des Netzteils oder dem Potential des Hauserders verbunden.

Über die Schalter -S1Si bis -S4Si kann zwischen normalem Betrieb oder einem Prüfbetrieb, bei dem das OMICRON CMC angeschlossen wird, umgeschaltet werden.

Die Sekundärseite der Stromwandler wird mit den Messeingängen des Schutzgerätes und die Primärseite mit den zuvor beschriebenen Steckverbindungen des Hauptstromkreises des Netzmodells verbunden. Durch die Zusammenschaltung der Sekundärseiten von drei Stromwandlern und drei Messeingängen aus einem Drehstromzweig zu jeweils einem Sternpunkt kann über die Verbindung der beiden Sternpunkte der Summenstrom ermittelt werden.(Abbildung 2.11)

Dieser wird ebenfalls zu einem Stromeingang am Schutzgerät gelegt. Bei der Summenstrommessung des dritten Drehstromzweigs, der von der Steckverbindung -X3Si kommt, ist ein zusätzlicher Schalter -S5Si eingebaut. Dieser Schalter ermöglicht das Umschalten der Summenstrommessung vom Stromwandler zu einer externen Quelle. Somit können auch z.B Erdströme aus dem Netzmodell aufgenommen werden.

Die Spannungsmessung für das Schutzgerät erfolgt immer über das erste Drehstromsystem, welches von der Steckverbindung -X1Si kommt und auf der Primärseite des Stromwandler abgegriffen wird.

Damit das Schutzgerät die Leistungsschalter des Netzmodells ansteuern kann, gibt es die Steckverbindungen -X5Si bis -X8Si. Diese führen auch Rückmeldungen der Schalterposition mit, wodurch über diese Steckverbindungen digitale Ein- wie Ausgangssignale geleitet werden. Falls noch zusätzliche Signale für das Netzmodells benötigt werden, sind weitere digitale Ein-Ausgänge vom Schutzgerät an die Frontplatte des Schaltschranks verlegt.

Für die Kommunikation mit anderen Schutzgeräten bzw. mit Programmiergeräten ist das Schutzgerät mit zwei Switches verbunden. Ein Switch ist ein Lichtwellenleiter-Switch



Abbildung 2.11: Allgemeine Verschaltung der Sternpunkte zur Summenstrommessung

(-A1Sw1) und stellt die sichere und schnelle Kommunikation mit anderen Schutzgeräten her. Auch über sehr große Distanzen werden diese Signale sicher und schnell übermittelt. Der zweite Switch (-A1Sw2) ist ein Ethernet-Switch und verbindet das Schutzgerät mit einem Laptop, einem PC oder einem Leitsystem. Es soll den ständigen Zugriff auf deren Geräte für die Datenabfrage oder Konfiguration gewährleisten.



2.7 Schematischer Aufbau Schneider

In Abbildung 2.14 ist der Aufbau bzw. die Verschaltung für das Schutzgerät von Schneider mit den Komponenten im und auf dem Schaltschrank schematisch dargestellt. Zu sehen ist das Schneider Easergy MiCOM P634, welches mit Netzspannung versorgt wird.

Über die Steckverbindungen -X1Sc bis -X4Sc wird das Schutzgerät mit dem Hauptstromkreis des TU Graz-Netzmodells verbunden. Von diesen Steckverbindungen werden die 3-phasigen Leiter zu den Stromwandlern -T1Sc bis -T12Sc geführt und wieder zu den Steckverbindungen zurück geleitet. Ein weiterer Leiter, der von diesen Steckverbindungen kommt, ist die Verbindung mit dem Potentialausgleich des Netzmodells und diese wird auf einen eigenen Potentialausgleich im Schutz-Rack gelegt. Dieser Potentialausgleich ist nicht mit dem Potentialausgleich des Netzteils oder dem Potential des Hauserders verbunden.

Über die Schalter -S1Sc bis -S4Sc kann zwischen normalem Betrieb oder einem Prüfbetrieb, bei dem das OMICRON CMC angeschlossen wird, umgeschaltet werden.

Die Sekundärseite der Stromwandler wird mit den Messeingängen des Schutzgerätes und die Primärseite mit den zuvor beschriebenen Steckverbindungen des Hauptstromkreises des Netzmodells verbunden. Durch die Zusammenschaltung der Sekundärseiten von drei Stromwandlern und drei Messeingängen aus einem Drehstromzweig zu jeweils einem Sternpunkt kann über die Verbindung der beiden Sternpunkte der Summenstrom ermittelt werden. (Abbildung 2.13)

Dieser wird ebenfalls zu einem Stromeingang am Schutzgerät gelegt. Bei der Summenstrommessung des dritten Drehstromzweigs, der von der Steckverbindung -X3Sc kommt, ist ein zusätzlicher Schalter -S5Sc eingebaut. Dieser Schalter ermöglicht das Umschalten der Summenstrommessung vom Stromwandler zu einer externen Quelle. Somit können auch z.B Erdströme aus dem Netzmodell aufgenommen werden.

Die Spannungsmessung für das Schutzgerät erfolgt immer über das erste Drehstromsystem, welches von der Steckverbindung -X1Sc kommt und auf der Primärseite des Stromwandler abgegriffen wird.

Damit das Schutzgerät die Leistungsschalter des Netzmodells ansteuern kann, gibt es die Steckverbindungen -X5Sc bis -X8Sc. Diese führen auch Rückmeldungen der Schalterposition mit, wodurch über diese Steckverbindungen digitale Ein- wie Ausgangssignale geleitet werden. Falls noch zusätzliche Signale für das Netzmodell benötigt werden, sind weitere digitale Ein-Ausgänge vom Schutzgerät an die Frontplatte des Schaltschranks verlegt.

Für die Kommunikation mit anderen Schutzgeräten bzw. mit Programmiergeräten ist das Schutzgerät mit zwei Switches verbunden. Ein Switch ist ein Lichtwellenleiter-Switch (-A1Sw1) und stellt die sichere und schnelle Kommunikation mit anderen Schutzgeräten



Abbildung 2.13: Allgemeine Verschaltung der Sternpunkte zur Summenstrommessung

her. Auch über sehr große Distanzen werden diese Signale sicher und schnell übermittelt. Der zweite Switch (-A1Sw2) ist ein Ethernet-Switch und verbindet das Schutzgerät mit einem Laptop, einem PC oder einem Leitsystem. Es soll den ständigen Zugriff auf die Geräte für deren Datenabfrage oder Konfiguration gewährleisten.





29

2.8 Erstellen einer Materialliste

In Excel wurde eine Materialliste als Vorschlag für die externe Firma, welche den Schaltschrank anfertigt, erstellt. Diese Liste diente als Orientierung und sollte den Aufwand des Herstellers verringern.

Da der Umfang der Materialliste sehr groß ist, wird sie nicht in dieser Arbeit angeführt.

2.9 Erstellen einer Verdrahtungsliste

In Excel wurde eine Verdrahtungsliste für die externe Firma, welche den Schaltschrank anfertigt, erstellt. Diese Liste diente als Vorlage für die Planung und sollte den Aufwand dieser Firma verringern. Die Verdrahtungsliste des Schaltschranks wurde in E-Plan umgesetzt.

Für die Erstellung der Verdrahtungsliste wurden die Betriebsanleitungen [13] [12] [19] [18] [3] und die Datenblätter [11] [17] aller drei Schutzgeräte herangezogen. Eine intensive Beschäftigung mit der Hardware aller drei Schutzgeräte war nötig. Die Listen wurden mehrfach auf Fehler überprüft, bevor diese an den Hersteller des Schaltschranks geschickt wurde.

Da die Verdrahtungsliste essenziell für die praktische Umsetzung diese Arbeit war, aber nicht essentiell für den schriftlichen Teil ist, werden diese und auch der fertige Schaltplan im Anhang nicht angeführt. 3 Implementierung des Andritz HIPASE-P-Schutzgerätes

3.1 Laboraufbau

Da zum Zeitpunkt der Messungen für diese Arbeit der Schaltschrank für das neue Schutz-Rack der TU Graz auf Grund von Lieferproblemen nicht verfügbar war, wurde der Versuchsaufbau mit Hilfe des Equipments im Labor erstellt. (siehe Abbildung 3.1) Für die Einarbeitung in das Netzmodell wurde das Skript Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme [5] herangezogen und für die Umsetzung in das Konzept des Generatorschutzes das IEEE-Tutorial [2] verwendet.

3.1.1 Laboraufbau mit Komponenten des Netzmodells und dem Andritz HIPASE-P

Das in Abbildung 3.2 dargestellte Schema zeigt den Aufbau im Labor des Institutes für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz. In Abbildung 3.1 ist der Versuchsaufbau für die Überprüfung und Verifizierung der in Kapitel 3.3 berechneten Parameter für das HIPASE-P-Schutzgerät von Andritz zu sehen. Für diese Arbeit wurde der Inselbetrieb des Generators mit direkter kurzer Verbindung zu einem rein ohmschen Verbraucher gewählt, also ohne Anbindung an das Netz. Es ist dabei eine fixe Last zuschaltbar, welche den Nennbetrieb darstellt, und eine einstellbare Last, mit der verschiedene Lastfälle oder auch Störungen bzw. Netzfehler zugeschaltet werden können.

Die Komponenten des Laboraufbaus sind im Folgenden aufgelistet und ergänzen die Abbildung 3.2 und Abbildung 3.1.

Implementierte Komponenten:

- Andritz-Schutzgerät [12] [13] [11] (-A1A), in Abbildung 3.1 blau eingerahmt
- Lichtwellenleiter-Switch mit passendem Kabel (-A1Sw)

Vorhandene Komponenten des TU Graz-Netzmodells:

- Generator [9] mit seiner Steuereinheit und dem Servomotor [7], in Abbildung 3.1 grün eingerahmt
- Versorgung der Erregerspannung, in Abbildung 3.1 rot eingerahmt
- Block-Transformator (UT) [8], in Abbildung 3.1 orange eingerahmt
- Hauptleitungen (4-mm-Sicherheits-Federstecker)
- Signalleitungen (4-mm-Sicherheits-Federstecker)
- Messleitungen (4-mm-Sicherheits-Federstecker)
- Strom- und Spannungswandler bzw. Messeinrichtungen (VM1,CM1,CM2,GC1), in Abbildung 3.1 rosa eingerahmt
- Leistungsschalter [6] (CB1,CB2,CB3,CB4), in Abbildung 3.1 gelb eingerahmt
- Fixe ohmsche Last, in Abbildung 3.1 violett eingerahmt
- Einstellbare ohmsche Last, in Abbildung 3.1 dunkelgrün eingerahmt



Abbildung 3.1: Umsetzung des Schemas des Laboraufbaus





3.2 Gesammelte Parameter des Laboraufbaus für das HIPASE-P

In der nachfolgenden Abbildung 3.3 ist die Legende für die Bedeutung der farblichen Kennzeichnung der wichtigsten Parameter und Funktionen zu sehen. In diesem Punkt des Kapitels wird konkret die farbliche Kennzeichnung der Parameter des Generators, der Last und des Blocktransformators dargestellt. Die Definitionen der Farbgebung ist folgendermaßen erklärt: Dunkelgrün mit schwarzer Schrift bedeutet, dass die Messung der Schutzfunktion erfolgreich durchgeführt wurde und der Parameter damit verifiziert ist. Hellgrün mit dunkelgrüner Schrift steht für korrekt berechnete Parameter, welche in die Software des Schutzgerätes übertragen werden können. Lachs mit dunkelgrauer Schrift sind benötigte Eingabewerte für die Excel-Tabelle zur Berechnung der Parameter der Schutzfunktionen. Hellgrau mit oranger Schrift stellt Berechnungsergebnisse der Excel-Tabelle dar. Weiß mit schwarzer Schrift sind eingestellte Werte, welche ins Schutzgerät übertragen wurden oder bei einer der anderen Komponenten justiert werden mussten. Grau mit schwarzer Schrift werden alle Schutzfunktionen markiert, bei denen eine Messung mit dem Versuchsaufbau nicht möglich oder sinnvoll war.

Aufgezeichnete Messungen	Eingestellte Werte	Messung nicht möglich/sinnvoll		
Parameterwerte	Eingabewerte	Ergebnisse der Berechungen		

Abbildung 3.3: Legende für die Farbgebung in den nachfolgenden Tabellen

Alle Berechnungen der Parameter, wie zum Beispiel zur Bestimmung der Impedanz, der Reaktanz, des ohmschen Widerstandes und des Winkels wurden mit Excel durchgeführt. Auch die grafische Darstellung der Parameterwerte für die Schutzfunktionen 21G, 40G und 78G wurde in Excel erstellt.

In den nachfolgenden Parametern wird immer mit der Impedanz gerechnet. In realen Systemen ist die Reaktanz um ein Vielfaches höher als der ohmsche Anteil, sodass die Reaktanz annähernd der Impedanz entspricht. Dort ist es somit ausreichend, mit der Reaktanz zu rechnen. Dies trifft nicht auf die Komponenten im Labor zu, hier leistet der ohmsche Anteil einen bedeutsamen Beitrag zur Impedanz.

3.2.1 Parameter des Generators

In der nachfolgenden Tabelle 3.1 sind die benötigten Parameter bzw. Eingabewerte für die Berechnungen der Schutzfunktionen angeführt sowie deren Kurzbeschreibung und etwaige Kommentare. Die Werte der Ströme und der Spannungen aus der Tabelle sind in Effektivwerten angegeben. Die Frequenz, der Leistungsfaktor, die Widerstände, die subtransienten und transienten Widerstände sind aus dem Datenblatt [9] des Generators entnommen. Der subtransiente Widerstand R''_{Gd} und der transiente Widerstand R''_{Gd} sind unbekannt, aber im Verhältnis zu den zugehörigen Reaktanzen vernachlässigbar klein und können mit 0 Ω angenommen werden.

Grundparameter des Generators							
Kurzbeschreibung	Wert	Einh.	inh. Kommentar Kurzbeschreibung		Wert	Ein.	Kommentar
Nennspannung AC $(U_{\rm N})$	110,00	v	V eingestellt ohmscher Widerstand (R_{GS})		10,3	Ω	Datenblatt
Nennfrequenz (f_N)	50,00	Hz	eingestellt synchrone Reaktanz (X_{Gd})		301j	Ω	Datenblatt
Nennstrom AC (I_N)	0,072	Α	eingestellt transiente Reaktanz (X'_{Gd})		4,56j	Ω	Datenblatt
Spannungsbereich DC(Erregung)	12,0-21,8	v	eingestellt	subtransiente Reaktanz (X''_{Gd})	2,3j	Ω	Datenblatt
Strombereich DC (Erregung)	163-180	mA	eingestellt	ohmscher Rotorwiderstand $(R_{\rm R})$	73	Ω	Datenblatt
transienter Widerstand R'_{Gd}	0	Ω	vernach- lässigt Nenndrehzahl $(n_{\rm N})$		1500	min ⁻¹	Datenblatt
subtransienter Widarstand $R''_{\rm Gd}$	0	Ω	vernach- lässigt R ₂		0	Ω	vernach- lässigt
Leistungsfaktor 0,8-1-0,8 (p _f)	1	-	Datenblatt	Reaktanze Gegensystem (X_2)	2,3j	Ω	berechnet

Tabelle 3.1: Nenndaten und Parameter des Generators

3.2.2 Parameter der Last

In der nachfolgenden Tabelle 3.2 sind die benötigten Parameter bzw. Eingabewerte für die Berechnungen der Schutzfunktionen angeführt sowie deren Kurzbeschreibung und etwaige Kommentare. Am Ende der Tabelle sind noch die Einstellungen genannt, mit denen die Messung durchgeführt wurden. Die Werte des Stromes und der Spannungen aus der Tabelle sind in Effektivwerten angegeben.

Daten der Last					
Kurzbeschreibung	Wert	Einh.	Kommentar		
Strom bei Maximallast (I _{full})	0,094	A	Strom bei 104,5 V (95% der Nennspannung und bei maximaler Last)		
maximale Last (\underline{Z}_{max})	620	Ω	Ohmscher Widerstand gemessen mit einem Fluke 175		
Nennlast (\underline{Z}_{load})	903,5	Ω	Ohmscher Widerstand gemessen mit einem Fluke 175		
Einstellbare Last (Z _{var})	0-1020	Ω	Ohmscher Widerstand gemessen mit einem Fluke 175		
eingestellte Spannung DC: 15,05 V (Erregung)		eingestellter Strom DC: 178 mA (Erregung)	Eingestellt für 104,5 V Klemmspannung		

Tabelle 3.2: Parameter der Last

Der Strom I_{full} ist der maximale Strom, der zum Fließen kommt, wenn die maximale Last $\underline{Z}_{\text{max}}$ an den Generator-Transformator-Block zugeschaltet wird. Die maximale Last ist dadurch bestimmt, dass bei dieser Last die Spannung an den Generatorklemmen den Grenzwert von 95% der Nennspannung nicht unterschreitet. Diese Grenze ist im IEEE Std C37.102TM-2006 [14] zu finden.

Die Impedan
z $\underline{Z}_{\rm load}$ ist die Nennlast und ist im Kapitel 3.1 in Abbildung 3.1 zu sehen. Bei diesem Wert der Last wird die Klemmspannung von 110 VAC des Generators bei einer eingestellten Erregerspannung von 15,05 VDC und einem Erregerstrom von 178 mA gehalten.

Die variable Last \underline{Z}_{var} ist ein einstellbarer ohmscher Widerstand, der im Bereich von 0 bis 1020 Ω stufenlos verstellt werden kann, und ist im Kapitel 3.1 in Abbildung 3.1 zu finden.

3.2.3 Parameter des Blocktransformators

In der nachfolgenden Tabelle 3.3 sind die benötigten Parameter bzw. Eingabewerte für die Berechnungen der Schutzfunktionen angeführt sowie deren Kurzbeschreibung dessen und etwaige Kommentare. Die Werte der Ströme, der Spannungen und der Leistungen aus der Tabelle sind in Effektivwerten angegeben.

Parameter des Transformators					
Kurzbeschreibung	Wert	Einh.	. Kommentar		
VT ratio	1	-	Übersetzungsverhältnis Spannungswandler		
CT ratio	1	-	Übersetzungsverhältnis Stromwandler		
$R_{ m primCU}$	48,00	Ω	Ohmscher Widerstand der Primärwicklung, gemessen mit eine Fluke 175		
$R'_{ m secCU}$	44,50	Ω	Ohmscher Widerstand der Sekundärwicklung bezogen auf d Primärseite, gemessen mit einem Fluke 175		
$U_{\rm NT}$	110,00	V	Nennspannung des Transformators		
I _{NT}	0,145	Α	Nennstrom des Transformators		
I _{NL}	0,016	Α	Strom des Transformators bei Leerlauf		
$P_{\rm NL}$	1,28	W	Wirkleistung des Transformators bei Leerlauf		
$U_{\mathbf{k}}$	18,10	V	Kurzschlussspannung bei Kurzschluss mit Nennstrom		
P _{SC}	1,84	W	Wirkleistung bei Kurzschluss mit Nennstrom		

Tabelle 3.3: Parameter des Blocktransformators

Die Messwerte $U_{\rm NT}$, $I_{\rm NT}$, $I_{\rm NL}$, $P_{\rm NL}$, $U_{\rm K}$ und $P_{\rm SC}$ wurden für die Parameterbestimmung des Transformators aufgenommen. Die Messwerte $U_{\rm NT}$, $U_{\rm K}$ und $P_{\rm SC}$ wurden mit dem Kurzschlussversuch ermittelt und die Messwerte $I_{\rm NT}$, $I_{\rm NL}$ und $P_{\rm SC}$ wurden mittels Leerlaufversuch ermittelt. Mit diesen Messergebnissen lassen sich sämtliche wichtigen Parameter des Transformators ausreichend genau bestimmen.

3.2.4 Grundlegende Berechnungen für die nachfolgende Schutzfunktionen

Alle nachfolgenden Berechnungen halten sich an die Vorgaben des IEEE Std C37.102TM-2006 [14].

In der Gleichung 3.1 ist die Berechnung für die Längsreaktanz X_{TGsig} umgerechnet auf die Nenndaten des Generators dargestellt. Es werden dafür die mit dem Multimeter gemessenen Daten von Tabelle 3.3 herangezogen. Die Scheinleistung $\underline{S}_{\text{SC}}$ und die Blindleistung Q_{SC} aus dem Kurzschlussversuch werden ebenfalls mit den Daten der Tabelle 3.3 berechnet.

$$X_{\text{TGsig}} = \frac{Q_{\text{SC}}}{(I_{\text{NT}})^2} = \frac{\sqrt{(\underline{S}_{\text{SC}})^2 - (P_{\text{SC}})^2}}{(I_{\text{NT}})^2} = \frac{\sqrt{(U_{\text{K}} \cdot I_{\text{NT}})^2 - (P_{\text{SC}})^2}}{(I_{\text{NT}})^2} = \frac{\sqrt{(18,10 \text{ V} \cdot 0,145 \text{ A})^2 - (1,84 \text{ W})^2}}{(0,145 \text{ A})^2} = 89,01 \Omega$$
(3.1)

In der Gleichung 3.2 ist die Berechnung für die Transformatorimpedanz \underline{Z}_{TG} umgerechnet auf die Nenndaten des Generators dargestellt. Es werden dafür die mit dem Multimeter gemessenen ohmschen Widerstände R_{primCU} , R'_{sekCU} aus den Daten von Tabelle 3.3 und die mit den Kurzschlussversuch ermittelte Längsreaktanz von Gleichung 3.1 herangezogen.

$$\underline{Z}_{TG} = (R_{primCU} + R'_{sekCU}) + jX_{TGsig} =$$

= (48 \Omega + 44, 5 \Omega) + j89,01 \Omega = 92, 5 \Omega + j89,01 \Omega
(3.2)

In der Gleichung 3.3 ist die Berechnung für den Betrag der Impedanz $|\underline{Z}_{TG}|$ dargestellt.

$$|\underline{Z}_{\rm TG}| = \sqrt{(R_{\rm primCU} + R'_{\rm sekCU})^2 + (X_{\rm TGsig})^2} =$$

= $\sqrt{(92,5)^2 + (88,17)^2} = 128,37 \ \Omega$ (3.3)

In der Gleichung 3.4 ist die Berechnung für den Betrag der Grundimpedanz $|Z_{\rm B_relay}|$ dargestellt. Sie wird mit den gemessenen Effektivwerten des Schutzgerätes bei Nennlast ermittelt, basierend auf der Spannungs- und Stromebene des Schutzgerätes bzw. Schutzrelais. Schutzgeräte schützen Anlagen in Spannungs- und Stromebenen, welche das 100-Fache bzw. 1000-Fache dessen betragen können. Da alle eingesetzten Wandler das Verhältnis von 1:1 haben, kann direkt mit den gemessenen Nenneffektivwerten aus Tabelle 3.1 gerechnet werden.

$$|\underline{Z}_{B_{relay}}| = \frac{U_{N}}{\sqrt{3} \cdot I_{N}} = \frac{110 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,072 \text{ A}} = 882,06 \Omega$$
(3.4)

In der Gleichung 3.5 ist die Berechnung des maximalen Outputs des Fehlerstroms I_{WCout} aus dem Generator dargestellt. Dieser wird mit den gemessenen Effektivwerten des Schutzgerätes ermittelt und basiert auf der Spannungs- und Stromebene des Schutzgerätes bzw. Schutzrelais bei Nennlast. Schutzgeräte schützen Anlagen in Spannungsund Stromebenen, welche das 100-Fache bzw. 1000-Fache dessen betragen können. Da alle eingesetzten Wandler das Verhältnis von 1:1 haben, kann direkt mit dem Betrag der subtransienten Reaktanz des Generators aus Tabelle 3.1 und dem Betrag der Impedanz $|\underline{Z}_{TG}|$ aus der Gleichung 3.3 gerechnet werden. Im Inselbetrieb gibt es nur die Nennspannung U_N , deshalb wird nur mit dieser gerechnet.

$$I_{\rm WCout} = \frac{U_{\rm N}}{\sqrt{3} \cdot (|X_{\rm Gd}''| + |\underline{Z}_{\rm TG}|)} = \frac{110 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (2,3 \ \Omega + 128,37 \ \Omega)} = 0,486 \text{ A}$$
(3.5)

In der Gleichung 3.6 ist die Berechnung der neuen Nennleistung P_{Nnew} dargestellt. Der Wert der Nennleistung P_{N} kann nicht vom Typenschild übernommen werden, weil für den Generator eine neue Nennspannung und ein neuer Nennstrom definiert wurden. Dies war auf Grund der geringeren Nennspannung aller Komponenten des Netzmodells erforderlich. Sie wird mit den gemessenen Effektivwerten des Schutzgerätes bei Nennlast ermittelt und basiert auf der Spannungs- und Stromebene des Schutzgerätes bzw. Schutzrelais. Schutzgeräte schützen Anlagen in Spannungs- und Stromebenen, welche das 100-Fache bzw. 1000-Fache dessen betragen können. Da alle eingesetzten Wandler das Verhältnis von 1:1 haben, kann direkt mit den gemessenen Nenneffektivwerten aus Tabelle 3.1 gerechnet werden.

$$P_{\text{Nnew}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{N}} \cdot I_{\text{N}} \cdot p_{\text{f}} = \sqrt{3} \cdot 110 \text{ V} \cdot 0,072 \text{ A} \cdot 1 = 13,7 \text{ W}$$
 (3.6)

In der Gleichung 3.7 ist die Berechnung des maximalen Inputs des Fehlerstroms I_{WCin} in den Generator dargestellt. Sie wird mit den gemessenen Effektivwerten des Schutzgerätes bei Nennlast ermittelt und basiert auf der Spannungs- und Stromebene des Schutzgerätes bzw. Schutzrelais. Schutzgeräte schützen Anlagen in Spannungs- und Stromebenen, welche das 100-Fache bzw. 1000-Fache dessen betragen können. Da alle eingesetzten Wandler das Verhältnis von 1:1 haben, kann direkt mit dem Betrag der Reaktanz des Gegensystems des Generators aus der Gleichung 3.8, dem Betrag der minimalen Netzimpedanz $|\underline{Z}_{minSG}|$ und dem Betrag der Transformatorimpedanz $|\underline{Z}_{TG}|$ aus der Gleichung 3.3 gerechnet werden. Da in diesem Laboraufbau der Inselbetrieb gewählt wurde, existiert kein Netzanschluss und damit keine minimale Netzimpedanz. Im Inselbetrieb gibt es nur die Nennspannung U_N , deshalb wird nur mit dieser gerechnet.

$$I_{\rm WCin} = \frac{U_{\rm N}}{\sqrt{3} \cdot (|\underline{Z}_{\rm minSG}| + |X_2| + |\underline{Z}_{\rm TG}|)} = \frac{110 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0 \ \Omega + \ 2, 3 \ \Omega + \ 128, 37 \ \Omega)} = 0,486 \text{ A}$$
(3.7)

Da für den Generator die Reaktanz des Gegensystems X_2 unbekannt ist, wird sie wie in den Unterlagen aus der Vorlesung, Electrical Machines for Power Engineering (431.120) Synchronous Machine Seite 9-11 vom Institut für elektrische Antriebstechnik und Maschinen [1], ermittelt. In der nachfolgenden Gleichung 3.8 ist die Berechnung der Reaktanz des Gegensystems X_2 dargestellt. Im Laboraufbau handelt es sich um eine Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung, wonach laut den Unterlagen Electrical Machines for Power Engineering (431.120) Synchronous Machine [1] die subtransiente Reaktanz des Generators X''_{Gd} ungefähr X''_{Gq} entspricht. Für die Vereinfachung der Berechnung werden die beiden Werte gleichgesetzt.

$$|X_2| = |\frac{X''_{Gd} + X''_{Gq}}{2}| \Rightarrow X''_{Gd} = X''_{Gq} \Rightarrow |X_2| = |\frac{X''_{Gd} + X''_{Gd}}{2}| = |X''_{Gd}| = 2,3 \Omega$$
(3.8)

In der Gleichung 3.9 ist die Berechnung der Gesamtimpedanz \underline{Z}_{total} dargestellt. Diese hält sich an den Unterlagen von ELIN [10]. Dort ist auch ein Ersatzschaltbild zu finden. Da der Wert der transienten Reaktanz X'_{Gd} im Allgemeinen um ein Vielfaches größer ist als dessen ohmscher Anteil, wird dieser hier vernachlässigt. Es werden für die Berechnung die Werte aus Tabelle 3.1 verwendet. Da in diesem Laboraufbau der Inselbetrieb gewählt wurde, existiert kein Netzanschluss und damit keine minimale Netzimpedanz. $\underline{Z}_{minSG} = 0 \ \Omega$

$$\underline{Z}_{\text{total}} = X'_{\text{Gd}} + \underline{Z}_{\text{TG}} + \underline{Z}_{\text{minSG}} = j4,56 \ \Omega + 92,5 \ \Omega + j89,01 \ \Omega + 0 = 92,5 \ \Omega + j93,57 \ \Omega$$
(3.9)

In der Gleichung 3.10 ist die Berechnung des Betrags der Gesamtimpedan
z $|\underline{Z}_{\rm total}|$ dargestellt.

$$\frac{|\underline{Z}_{\text{total}}|}{=\sqrt{\Re(\underline{Z}_{\text{total}})^2 + \Im(\underline{Z}_{\text{total}})^2}} = (3.10)$$
$$=\sqrt{(92,5)^2 + (93,57)^2} = 131,57 \ \Omega$$

3.3 Parameterbestimmung der verifizierbaren Schutzfunktionen

3.3.1 Allgemeines zur Parameterbestimmung der Schutzfunktionen

In den folgenden Kapiteln sind die Theorie, der Rechenweg und die ermittelten Parameter für die Schutzfunktionen des HIPASE-P-Schutzgerätes der Firma Andritz in Tabellenform enthalten.

Da im Laboraufbau nur Stromwandler mit einer Übersetzung von 5 A : 5 A und keine Spannungswandler zum Einsatz gekommen sind, wurden in den Berechnungen keine Übersetzungsverhältnisse angeführt. Es werden zum Rechnen direkt die Messwerte verwendet und müssen nicht erst auf die Basis- bzw. Nennwerte des Schutzgerätes für Strom und Spannung umgerechnet werden.

Die Benennung der Parameter und Schutzfunktionen in den Tabellen und Kapiteln entspricht den Bezeichnungen aus der Andritz HIPASE-P-Software und trifft möglicherweise nicht auf Bezeichnungen von anderen Herstellern oder gewisser Literatur zu.

In der nachfolgenden Abbildung 3.4 ist die Legende für die Bedeutung der farblichen Kennzeichnung der wichtigsten Parameter und Funktionen zu sehen. In diesem Punkt des Kapitels wird konkret die farbliche Kennzeichnung der Parameter für die Schutzfunktionen dargestellt. Die Definitionen der Farbgebung ist folgendermaßen erklärt: Dunkelgrün mit schwarzer Schrift bedeutet, dass die Messung der Schutzfunktion erfolgreich durchgeführt wurde und der Parameter damit verifiziert ist. Hellgrün mit dunkelgrüner Schrift steht für korrekt berechnete Parameter, welche in die Software des Schutzgerätes übertragen werden können. Lachs mit dunkelgrauer Schrift sind benötigte Eingabewerte für die Excel-Tabelle zur Berechnung der Parameter der Schutzfunktionen. Hellgrau mit oranger Schrift stellt Berechnungsergebnisse der Excel-Tabelle dar. Weiß mit schwarzer Schrift sind eingestellte Werte auf Basis der Berechnungen, welche ins Schutzgerät übertragen wurden oder bei einem der anderen Komponenten justiert werden mussten. Grau mit schwarzer Schrift werden alle Schutzfunktionen markiert, bei denen eine Messung mit dem Versuchsaufbau nicht möglich oder sinnvoll war.

Aufgezeichnete Messungen	Parameterwerte	Eingestellte Werte	Eingabewert für die Schutzfunktion
Ergebnisse der Berechungen			Messung nicht möglich/sinnvoll

Abbildung 3.4: Legende für die Farbgebung in den nachfolgenden Tabellen

Alle Berechnungen für die Parameter wie zum Beispiel zur Bestimmung der Impedanz, der Reaktanz, des ohmschen Widerstandes und des Winkels wurden mit Excel durchgeführt. Auch die grafische Darstellung der Parameterwerte für die Schutzfunktionen 21G, 40G und 78G wurde in Excel erstellt.

In den nachfolgenden Parametern wird meistens mit der Impedanz gerechnet. In realen Systemen ist die Reaktanz um ein Vielfaches höher als der ohmsche Anteil, sodass die Reaktanz annähernd der Impedanz entspricht. Dort ist es somit ausreichend, mit der Reaktanz zu rechnen. Dies trifft aber nicht auf die Komponenten im Labor zu, hier leistet bei manchen Komponenten der ohmsche Anteil einen bedeutsamen Beitrag zur Impedanz.

Im Andritz HIPASE-P können die Schutzfunktionen in Stufen unterteilt werden, was den Vorteil bringt, dass verschiedene Anregewerte und Auslösezeiten für eine Schutzfunktion eingestellt werden können. Da diese Stufe in der Software nur einen weiteren Reiter mit den exakt selben Einstellmöglichkeiten öffnet, kann eine Stufe wie eine weitere Einbindung der selben Funktion gesehen werden. Daher werden in dieser Arbeit diese Stufen als Schutzfunktionen mit zusätzlichem Index dargestellt, so wie es auch in der Software umgesetzt wurde.

In der Schutztechnik gibt es die Anregung und die Auslösung, wobei die Anregung so definiert wird, dass, wenn der Einstellwert des Parameters je nach Anforderung unterbzw. überschritten wird, die Schutzfunktion aktiv ist. Ist die Schutzfunktion angeregt, erfolgt nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Einige Funktionen besitzen diese Einstellmöglichkeit für die Auslösezeit nicht und lösen nach dem Unter- bzw Überschreiten des Parameterwertes sofort aus.

Der Parameter **Rückfallzeit** in den nachfolgenden Tabellen definiert die Zeit, die vergeht, bis die Auslösung der Schutzfunktion nach Klären des Fehlers automatisch vom Schutzgerät zurückgesetzt wird. Da es dafür keine Empfehlungen in dem IEEE Std C37.102[™]-2006[14] gibt, werden hier die Standardwerte vom Hersteller übernommen.
3.3.2 Schutzfunktion 21G.1, Impedanzschutz

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.2.1 Theorie 21G.1

Bei der Schutzfunktion 21G handelt es sich um einen Impedanzschutz bzw. Distanzschutz. Die Bezeichnung Unterimpedanzschutz für diese Funktion wurde vom Hersteller des Schutzgerätes gewählt und in dieser Arbeit übernommen.

Der Unterimpedanzschutz ist eine sogenannte "Backup"-Schutzfunktion bzw. ein Reserveschutz und hat sich als zusätzlicher Schutz für Synchrongeneratoren bewährt. Dieser kommt zum Einsatz, falls andere redundante Schutzfunktionen versagen. Die Messung wird an den Generatorklemmen durchgeführt und die Impedanz wird mit Hilfe der Phasenspannung und des Phasenstromes über die Schutzfunktion Neutral-End berechnet, diese wird im Kapitel 3.4.6 genauer erläutert. Durch die Impedanzmessung und die Möglichkeit, verschiedene Anrege- und Auslösestufen einzustellen, kann auch der Transformator und ein Teil danach mit überwacht werden. Da in diesem Versuchsaufbau der Generator in Stern geschaltet ist, arbeitet das Schutzgerät direkt mit der Phasenspannung.

Mit den Parametern aus Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5 lassen sich zwei Schutzzonen im Impedanzdiagramm in Abbildung 3.5 oder Abbildung 3.6 darstellen. Unterschreitet der Impedanzwert diese Grenze und ist der Freigabestrom der jeweiligen Stufe überschritten, reagiert die Schutzfunktion. Zuerst kommt die Anregung und am Display bzw. in der Software des Schutzgerätes wird in gelber Schrift "Anregung" bzw. "Start" angezeigt. Auch die dementsprechende Schutzfunktion leuchtet in gelber Schrift auf. Bleibt der Impedanzwert unterschritten, erfolgt nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung und ein Schaltbefehl wird an den Leistungsschalter gesendet. Am Display bzw. in der Software des Schutzgerätes wird in roter Schrift "Auslösung" bzw. "Operate" angezeigt. Auch die dementsprechende Schutzfunktion leuchtet in roter Schrift auf. Im Kapitel 3.5 wird darauf näher eingegangen. Erst wenn der Fehler geklärt ist und die Rückfallzeit abgelaufen ist, kann eine Quittierung durchgeführt werden. Alle Anregungen und Auslösungen werden in einer Ereignisliste angeführt.

Der Freigabestrom ist laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] definiert als 115% des maximalen Laststromes. Der Anregewert für Zone 1 wird laut dieser NORM[14] auf 50% der Transformatorimpedanz bestimmt und ist auf die Nenndaten des Generators bezogen. Da in der Praxis und laut Betriebsanleitung des HIPASE-P-Schutzgerätes 70% als Parameterwert für die Zone 1 gängig ist, wird dieser Wert verwendet. Die Auslösezeit und die Rückfallzeit sind ebenfalls aus der IEEE Std C37.102[™]-2006[14] bzw. der Betriebsanleitung entnommen.

3.3.2.2 Berechnungen 21G.1

In der Gleichung 3.11 ist die Berechnung für den Freigabestrom des Parameters **21G/Freigabestrom Stufe 1** dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Stromes I_{full} bei maximaler Last aus Tabelle 3.2 entnommen.

$$I_{\text{Freigabe}_{\text{Zone1}}} = I_{\text{full}} \cdot 115\% = 0,094 \text{ A} \cdot 1,15 = 0,108 \text{ A}$$
 (3.11)

In der Gleichung 3.12 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **21G**/**Anregewert Impedanz Stufe 1** dargestellt. Da der Realteil des Transformators in der Größenordnung dessen Imaginärteils liegt, darf der Realteil nicht vernachlässigt werden. Daher wird in dieser Parameterbestimmung mit dem Betrag der Impedanz $|\underline{Z}_{TG}|$ gerechnet und nicht nur mit der Reaktanz. Der Betrag der Transformatorimpedanz wurde aus dem Ergebnis der Gleichung 3.3 entnommen.

$$Z_{\text{Zone1}} = |\underline{Z}_{\text{TG}}| \cdot 70\% = 128,27 \ \Omega \cdot 0,7 = 89,9 \ \Omega \tag{3.12}$$

3.3.2.3 Parameterwerte 21G.1

In der Tabelle 3.4 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
21G.1	Unterimpedanz 3-phasig (Zone1)	21G/Freigabestrom Stufe 1 (<i>I</i> _{FreigabeZonel})	0,108	0,11	А	115% des Stromes I _{full} bei maximaler Last für die Freigabe der Funktion
		21G/Anregewert Impedanz Stufe 1 (Z _{Zonel})	89,9	89,9	Ω	(laut Norm 50%) 70% of $ Z_{TG} $
		21G/Auslösezeit Stufe 1	0,5	0,5	s	Wert laut IEEE Standard für diese Funktion
		21G/Rückfallzeit Stufe 1	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,05	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	179	mA	von 110 V zu erhalten	
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	89,3	Ω	

Tabelle 3.4: Parameter der Schutzfunktion 21G.1, Unterimpedanzschutz 3-phasig

3.3.2.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 21G.1

In der nachfolgenden Abbildung 3.5 ist das Impedanzdiagramm mit der Nennlast aus Kapitel 3.2.2 und der Grenzlinie aus den Parametern der Zone 1 dargestellt. Auf der Abszisse befindet sich der Realteil der Impedanz und auf der Ordinate der Imaginärteil. Die Nennlast ist mit einem grünen Punkt gekennzeichnet und zeigt deren Position im Diagramm. Mit einem roten Kreis wird die Grenze für den Anrege- und den Auslösewert für die Zone 1 dargestellt. Jeder Impedanzwert, welcher im Inneren des Kreises liegt, gehört zur Anrege- bzw. Auslösezone. Zone 1 wird von den Parametern der Schutzfunktion 21G.1 (Kapitel 3.3.2) und Zone 2 (Kapitel 3.3.3) wird von den Parametern der Schutzfunktion 21G.2 eingegrenzt.



Abbildung 3.5: Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 21G.1 als Kreis im Impedanzdiagramm

3.3.3 Schutzfunktion 21G.2, Impedanzschutz

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.3.1 Theorie 21G.2

Der theoretische Hintergrund und die Vorgehensweise entsprechen dem der Schutzfunktion 21G.1. Es werden nur Unterschiede von Zone 1 zu Zone 2 angeführt.

Der Freigabestrom ist laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] definiert als 115% des maximalen Laststromes. Der Anregewert für Zone 2 wird laut NORM auf 120% der Transformatorimpedanz bestimmt und ist auf die Nenndaten des Generators bezogen. Auch in der Praxis wird dieser Parameterwert für das HIPASE-P-Schutzgerät für Zone 2 verwendet.

Die Auslösezeit und die Rückfallzeit sind ebenfalls aus der IEEE Std C37.102[™]-2006[14] bzw.der Betriebsanleitung entnommen.

3.3.3.2 Berechnungen 21G.2

In der Gleichung 3.13 ist die Berechnung für den Freigabestrom des Parameters 21G/Frei-gabestrom Stufe 2 dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Stromes I_{full} bei maximaler Last aus Tabelle 3.2 entnommen.

$$I_{\text{Freigabe}_{\text{Zone}^2}} = I_{\text{full}} \cdot 115\% = 0,094 \text{ A} \cdot 1,15 = 0,108 \text{ A}$$
 (3.13)

In der Gleichung 3.14 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **21G/Anrege**wert Impedanz Stufe 2 dargestellt. Da der Realteil des Transformators in der Nähe des Imaginärteils liegt, darf der Realteil nicht vernachlässigt werden. Daher wird in dieser Parameterbestimmung mit dem Betrag der Impedanz gerechnet und nicht nur mit der Reaktanz. Der Betrag der Transformatorimpedanz wurde aus dem Ergebnis der Gleichung 3.3 entnommen.

$$Z_{\text{Zone2}} = |\underline{Z}_{\text{TG}}| \cdot 120\% = 128,37 \ \Omega \cdot 1,2 = 154,0 \ \Omega \tag{3.14}$$

3.3.3.3 Parameterwerte 21G.2

In der Tabelle 3.5 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
21G.2	Unterimpedanz 3-phasig (Zone2)	21G/Freigabestrom Stufe 2 (<i>I</i> _{FreigabeZone2})	0,108	0,11	А	115% des Stromes I _{full} bei maximaler Last für die Freigabe der Funktion
		21G/Anregewert Impedanz Stufe 2 (Z _{Zone2})	154,0	154,0	Ω	120% of <u> Z</u> _{TG}
		21G/Auslösezeit Stufe 2	1	1	s	Wert laut IEEE Standard für diese Funktion
		21G/Rückfallzeit Stufe 2	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	15,05	V	Eingestellt, um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	177	mA	von 110 V zu erhalten	
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	150,2	Ω	

Tabelle 3.5: Parameter der Schutzfunktion 21G.2, Unterimpedanzschutz 3-phasig

3.3.3.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 21G.2

In der nachfolgenden Abbildung 3.6 ist das Impedanzdiagramm mit der Nennlast aus Kapitel 3.2.2, der Grenzlinien aus den Parametern der Zone 1 (Kapitel 3.3.2) und der Zone 2 (Kapitel 3.3.3) dargestellt. Auf der Abszisse befindet sich der Realteil der Impedanz und auf der Ordinate der Imaginärteil. Die Nennlast ist mit einem grünen Punkt gekennzeichnet und zeigt deren Position im Diagramm. Mit einem roten Kreis wird die Grenze für den Anrege- und den Auslösewert für die Zone 1 und mit einem gelben Kreis wird die Grenze für den Anrege- und den Auslösewert für die Zone 2 dargestellt. Jeder Impedanzwert, welcher im Inneren der Kreise liegt, gehört zur Anrege- bzw. Auslösezone. Zone 1 wird von den Parametern der Schutzfunktion 21G.1 und Zone 2 wird von den Parametern der Schutzfunktion 21G.2 eingegrenzt.



Abbildung 3.6: Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 21G.1 und 21G.2 als Kreise im Impedanzdiagramm

3.3.4 Schutzfunktion 24G, Übererregung

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE St
d $\rm C37.102^{TM}\text{-}2006[14]$

3.3.4.1 Theorie 24G

Die Schutzfunktion 24G misst und überwacht das Verhältnis von Spannung zu Frequenz. Wird das Verhältnis zwischen den beiden Faktoren zu groß, kommt es laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] zur Sättigung des Eisenkerns und damit zu einer Verringerung der Reaktanz am Generator oder am Blocktransformator. Um diese zu schützen, wird laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] empfohlen, dass der Anregeparameter auf 118% des Nennverhältnisses eingestellt wird und eine Auslösezeit von zwei bis sechs Sekunden haben soll. Wird der Wert des Parameters 24G/Anregewert überschritten, erfolgt die Anregung. Nach dem Ablaufen der Auslösezeit wird ein Schaltsignal an den Leistungsschalter gesendet. Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten und im Bereich der Aufzeichnung des Schutzgerätes zu bleiben, wird eine Auslösezeit von 2 Sekunden gewählt.

3.3.4.2 Berechnungen 24G

In der Gleichung 3.15 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **24G/Anrege**wert dargestellt. Die Werte für die Nennspannung sowie die Nennfrequenz werden aus Tabelle 3.1, in welcher die Generatordaten angegeben sind, entnommen.

$$U_{\rm f} = \frac{U_{\rm N}}{f_{\rm N}} \cdot 118\% = \frac{110 \text{ V}}{50 \text{ Hz}} \cdot 1, 18 = 2,60 \text{ V/Hz}$$
 (3.15)

3.3.4.3 Parameterwerte 24G

In der Tabelle 3.6 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
24G	Volt-pro-Hertz	24 G/Anregewert ($U_{\rm f}$)	2,60	2,60	V/Hz	Anregung: 118% vom Nennverhältnis
		24G/Auslösezeit	2	2	s	Zeitverzögerung: 2s-6s
		24G/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	18,60	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	220	mA	von 110 V zu erhalten	
	ohmsch fixer Wid	ohmsch fixer Widerstand			Ω	

Tabelle 3.6: Parameter der Schutzfunktion 24G, Übererregungsschutz

3.3.5 Schutzfunktion 27G.1, Unterspannungsschutz

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14]

3.3.5.1 Theorie 27G.1

Der Unterspannungsschutz soll den Generator vor zu niedriger Spannung schützen. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden und einen höheren Schutz zu gewährleisten, empfiehlt die IEEE Std C37.102[™]-2006[14], diese Schutzfunktion in zwei Stufen zu unterteilen. Die Schutzfunktion 27G.1 wird als erste Stufe definiert und soll nach 10 bis 15 Sekunden unter 90% der Nennspannung den Generator vom Netz nehmen. Somit hat die Maschine Zeit, wieder in den zugelassenen Spannungsbereich zu kommen, ohne sofort auszulösen. Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten, wird eine Auslösezeit von 10 Sekunden gewählt. Die zweite Stufe wird im Kapitel 3.3.6 erläutert.

3.3.5.2 Berechnungen 27G.1

In der Gleichung 3.16 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **27G/Anrege**wert Spannung dargestellt. Der Wert für die Nennspannung wurde aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$U_{90} = U_{\rm N} \cdot 90\% = 110 \,{\rm V} \cdot 0,9 = 99 \,{\rm V} \tag{3.16}$$

3.3.5.3 Parameterwerte 27G.1

In der Tabelle 3.7 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
27G.1	Unterspannung 3- phasig	27G/Anregewert Spannung (U_{90}) (Stufe 1)	99	99	v	90% der Nennspannung (110V)
27G/Auslösezeit (Stufe 1)		10	10	s	Zeitverzögerung von 10 s bis15 s	
27G		27G/Rückfallzeit (Stufe 1)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	13,29	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	152	mA	unter 99 V zu erhalten	
	ohmsch fixer Wid	lerstand	-	903,5	Ω	

Tabelle 3.7: Parameter der Schutzfunktion 27G.1, Unterspannungsschutz

3.3.6 Schutzfunktion 27G.2, Unterspannungsschutz

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE St
d $\rm C37.102^{TM}\text{-}2006[14]$

3.3.6.1 Theorie 27G.2

Der Unterspannungsschutz soll den Generator vor zu niedriger Spannung schützen. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden und einen höheren Schutz zu gewährleisten, empfiehlt der IEEE Std C37.102[™]-2006[14], diese Schutzfunktion in zwei Stufen zu unterteilen. Die Schutzfunktion 27G.2 wird als zweite Stufe definiert und soll laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] nach 2 Sekunden unter 80% der Nennspannung den Generator vom Netz nehmen. Diese kurze Zeitspanne soll die Maschine und die Komponenten im System vor Beschädigung schützen. Die erste Stufe wird im Kapitel 3.3.5.1 erläutert.

3.3.6.2 Berechnungen 27G.2

In der Gleichung 3.17 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **27G/Anrege**wert Spannung dargestellt. Der Wert für die Nennspannung wurde aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$U_{80} = U_{\rm N} \cdot 80\% = 110 \,{\rm V} \cdot 0, 8 = 88 \,{\rm V} \tag{3.17}$$

3.3.6.3 Parameterwerte 27G.2

In der Tabelle 3.8 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
27G.2	Unterspannung 3- phasige	27G/Anregewert Spannung (U_{80}) (Stufe 2)	88	88	v	80% der Nennspannung (110V)
27G/Auslösezeit (Stufe 2)		2	2	s	Definierte Zeiteinstellung von 2 s	
27G/Ri (St		27G/Rückfallzeit (Stufe 2)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	11,90	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	136	mA	unter 88 V zu erhalten	
	ohmsch fixer Wid	lerstand	-	903,5	Ω	

Tabelle 3.8: Parameter der Schutzfunktion 27G.2, Unterspannungsschutz

3.3.7 Schutzfunktion 40G.1, Untererregung MHO

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.7.1 Theorie 40G.1

Für die Ermittlung der Parameter der Schutzfunktion Erregerfeldverlust bzw. Untererregung MHO (MHO ist die alte Bezeichnung für den Leitwert) kommt die "Method #1 negative offset mho "aus der IEEE Std C37.102TM-2006[14] zum Einsatz. Laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] wird empfohlen, den Schutz in zwei Stufen zu unterteilen. Die Schutzfunktion 40G.1 wird als Stufe 1 definiert und soll die Zone 1 eingrenzen. Stufe 2 wird im Kapitel 3.3.8 beschrieben.

Der Parameter 40G.1/ Center R in dieser Schutzfunktion ist die Verschiebung des Zentrums des Impedanzkreises im Realteil und wurde aus einer angepassten Vorgehensweise aus dem IEEE Std C37.102TM-2006[14] ermittelt. Diese orientiert sich an der Ermittlung des Parameters 40G.1/Center X. Daher wird für den Parameter 40G.1/ Center R der halbe Widerstandswert des Ständers R_{GS} als Off-Set benötigt. Wie dieser Parameter ermittelt wird, zeigt die Gleichung 3.18.

Der Parameter **40G.1/Center X** in dieser Schutzfunktion ist die Verschiebung des Zentrums des Impedanzkreises im Imaginärteil und benötigt laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] als Off-Set den halben negativen transienten Reaktanzwert X'_{Gd} . Wie dieser Parameter ermittelt wird, zeigt die Gleichung 3.19. Leider ist im IEEE Std C37.102TM-2006[14] nicht genauer erläutert, wie man zu dieser Vorgehensweise kommt.

Der Parameter **40G.1/Radius** in dieser Schutzfunktion ist der Radius des Impedanzkreises und wird als die halbe Grundimpedanz $|\underline{Z}_{B_{relay}}|$ definiert und wie in Gleichung 3.20 ermittelt. Die Grundimpedanz $|\underline{Z}_{B_{relay}}|$ wird im Kapitel 3.2.4 ermittelt. Da der ohmsche Widerstand viel geringer ist als die Reaktanz, kann dieser bei diesem Parameter vernachlässigt werden.

Laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] wird für Zone 1 eine Auslösezeit von 0,1 s empfohlen, um eine Fehlauslösung bei Schaltvorgängen zu verhindern. Da bei diesem Laboraufbau der Lastwiderstand um ein Vielfaches höher sein muss als die Innenimpedanz des Generators, damit die Nennspannung von 110 V gehalten werden kann, errechnet sich auch ein viel höherer Parameterwert. Für die Ermittlung der Parameter nach IEEE Std C37.102TM-2006[14] verhalten sich die Impedanzwerte des Laboraufbaus für die Parameter 40G.1/Radius der Stufe 1 (Kapitel 3.3.7) und 40G.2/Radius Stufe 2 (Kapitel 3.3.8) verkehrt zu einem Realen System. Deshalb wird für Stufe 1 die Berechnungsvorgabe beibehalten, jedoch die nach IEEE Std C37.102TM-2006[14] vorgeschlagene höhere Auslösezeit

von 0,5 s von Stufe 2 eingesetzt. Da in diesem Schutzgerät sehr viele Funktionen zum Einsatz kommen, werden zusätzlich 0,2 s addiert, um im Fehlerfall keine gleichzeitige Auslösung mit redundanten Schutzfunktionen zu haben.

Im Gegensatz zur Standard-Definition laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] ist bei dieser Schutzfunktion mit diesem Laboraufbau die Zone 1 als äußerer und die Zone 2 als innerer Schutzbereich festgelegt. Die Zonen sind im IEEE Std C37.102[™]-2006[14] ursprünglich verkehrt definiert. Das bedeutet, dass Zone 1 eine höhere Impedanz und auch eine längere Auslösezeit hat als Zone 2, was auf Grund der gewählten Komponenten nur für diesen Aufbau im Labor gilt und nicht für reale Komponenten aus einem Hochspannungssystem.

3.3.7.2 Berechnungen 40G.1

In der Gleichung 3.18 ist die Berechnung für den Off-Set des Parameters 40G/Center R dargestellt. Der Wert für den Ständerwiderstand ist aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$Center_{\rm RZ1} = \frac{R_{\rm GS}}{2} = \frac{10, 2\ \Omega}{2} = 5, 1\ \Omega \tag{3.18}$$

In der Gleichung 3.19 ist die Berechnung für den Off-Set des Parameters 40G/Center X dargestellt. Der Wert für die transiente Reaktanz ist aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$Center_{XZ1} = -\frac{X'_{Gd}}{2} = -\frac{4,56 \ \Omega}{2} = -2,28 \ \Omega \tag{3.19}$$

In der Gleichung 3.20 ist die Berechnung für den Radius des Parameters 40G/Radius dargestellt. Der Betrag der Grundimpedanz wurde aus dem Ergebnis der Gleichung 3.4 entnommen.

$$Radius_{Z1} = \frac{|Z_{B_relay|}}{2} = \frac{882,06 \ \Omega}{2} = 441,03 \ \Omega \tag{3.20}$$

3.3.7.3 Parameterwerte 40G.1

In der Tabelle 3.9 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
40G.1	Untererregung MHO 3 -phasig (Zone 1)	40G.1/ Mittelpunkt R (<i>Center</i> _{RZ1}) (Stufe1)	5,15	5,2	Ω	Verschiebung des Kreises R _{GS} /2 in R Richtung
40G.1/Mittelpunkt X (<i>Center</i> _{XZ1}) (Stufe1)		-2,28	-2,3	Ω	Verschiebung des Kreises $-X_{Gd}'/2$ in X Richtung	
		40G.1/Radius (<i>Radius</i> _{Z1}) (Stufe1)	441,03	300,0	Ω	Radius des Kreises 0,5* Z _{B_relay} (max. 300)
		40G.1/Auslösezeit (Stufe1)	0,7	0,7	s	0,5 laut Norm + 0,2 wegen Redundanz
		40G.1/Rückfallzeit (Stufe1)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,08	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		_	179	mA	von 110 V zu erhalten	
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	300,4	Ω	

Tabelle 3.9: Parameter der Schutzfunktion 40G.1, Untererregungsschutz

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet. In diesem konkreten Fall ist der berechnete Wert größer als der maximal einstellbare Wert des Parameters **40G/Radius** des HISPASE-P, weshalb dieser eingestellt wurde.

3.3.7.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 40G.1

In der nachfolgenden Abbildung 3.7 ist das Impedanzdiagramm mit der Nennlast aus Kapitel 3.2.2 und der Grenzlinie aus den Parametern der Stufe 1 dargestellt. Auf der Abszisse befindet sich der Realteil der Impedanz und auf der Ordinate der Imaginärteil. Die Nennlast ist mit einem grünen Punkt gekennzeichnet und zeigt deren Position im Diagramm. Mit einem roten Kreis wird die Grenze für den Anrege- und den Auslösewert für die Zone 1 dargestellt. Jeder Impedanzwert, welcher im Inneren der Kreise liegt, gehört zur Anrege- bzw. Auslösezone. Zone 1 wird von den Parametern der Schutzfunktion 40G.1 (Kapitel 3.3.7) und Zone 2 (Kapitel 3.3.8) wird von den Parametern der Schutzfunktion 40G.2 eingegrenzt. Da die Werte des Offsets der Parameter sehr klein sind im Vergleich zum Radius der Kreise, ist diese Verschiebung in der Grafik kaum zu erkennen.



Abbildung 3.7: Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 40G.1 als Kreis im Impedanzdiagramm

3.3.8 Schutzfunktion 40G.2, Untererregung MHO

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.8.1 Theorie 40G.2

Für die Ermittlung der Parameter der Schutzfunktion Erregerfeldverlust bzw. Untereregung MHO (MHO alte Bezeichnung für den Leitwert) kommt die "Method #1 negative offset mho "aus der IEEE Std C37.102TM-2006[14] zum Einsatz. Laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] wird empfohlen, den Schutz in zwei Stufen zu unterteilen. Die Schutzfunktion 40G.2 wird als Stufe 2 definiert und soll die Zone 2 eingrenzen. Stufe 1 wird im Kapitel 3.3.7 beschrieben.

Der Parameter 40G.2/ Center R in dieser Schutzfunktion ist die Verschiebung des Zentrums des Impedanzkreises im Realteil und wurde aus einer angepassten Vorgehensweise aus dem IEEE Std C37.102TM-2006[14] ermittelt. Diese orientiert sich an der Ermittlung des Parameters 40G.2/Center X. Daher wird für den Parameter 40G.2/ Center R der halbe Widerstandswert des Ständers R_{GS} als Off-Set benötigt. Wie dieser Parameter ermittelt wird, zeigt die Gleichung 3.18.

Der Parameter **40G.2/Center X** in dieser Schutzfunktion ist die Verschiebung des Zentrums des Impedanzkreises im Imaginärteil und benötigt laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] als Off-Set den halben negativen transienten Reaktanzwert X'_{Gd} . Wie dieser Parameter ermittelt wird, zeigt die Gleichung 3.19. Leider ist im IEEE Std C37.102TM-2006[14] nicht genauer erläutert, wie man zu dieser Vorgehensweise kommt.

Der Parameter **40G.2/Radius** in dieser Schutzfunktion ist der Radius des Impedanzkreises und wird als die halbe Grundimpedanz $|\underline{Z}_{B_{relay}}|$ definiert und wie in Gleichung 3.23 ermittelt. Die Grundimpedanz $|\underline{Z}_{B_{relay}}|$ wird im Kapitel 3.2.4 ermittelt. Da der ohmsche Widerstand viel geringer ist als die Reaktanz, kann dieser bei diesem Parameter vernachlässigt werden.

Laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] wird für Zone 2 eine Auslösezeit von 0,5 s empfohlen, um eine Fehlauslösung bei Leistungsschaltungen vorzubeugen. Da bei diesem Laboraufbau der Lastwiderstand um ein Vielfaches höher sein muss als die Innenimpedanz des Generators, damit die Nennspannung von 110 V gehalten werden kann, errechnet sich auch ein viel höherer Parameterwert. Für die Ermittlung der Parameter nach IEEE Std C37.102[™]-2006[14] verhalten sich die Impedanzwerte des Laboraufbaus für Stufe 1 und Stufe 2 verkehrt zu einem Realen System. Deshalb wird für Stufe 2 die Berechnungsvorgabe beibehalten, jedoch die niedere Auslösezeit von Stufe 1 eingesetzt. Da in diesem Schutzgerät sehr viele Funktionen zum Einsatz kommen, werden zusätzlich 0,2 s addiert, um im Fehlerfall keine gleichzeitige Auslösung mit redundanten Schutzfunktionen zu haben.

Im Gegensatz zur Standard-Definition laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] ist bei dieser Schutzfunktion mit diesem Laboraufbau die Zone 1 als äußerer und die Zone 2 als innerer Schutzbereich festgelegt. Die Zonen sind im IEEE Std C37.102[™]-2006[14] ursprünglich verkehrt definiert. Das bedeutet, dass Zone 1 eine höhere Impedanz und auch eine längere Auslösezeit hat als Zone 2, was auf Grund der gewählten Komponenten nur für diesen Aufbau im Labor gilt und nicht für reale Komponenten aus einem Hochspannungssystem.

3.3.8.2 Berechnungen 40G.2

In der Gleichung 3.21 ist die Berechnung für den Off-Set des Parameters 40G/Center R dargestellt. Der Wert für den Ständerwiderstand ist aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$Center_{\rm RZ2} = \frac{R_{\rm GS}}{2} = \frac{10, 2 \ \Omega}{2} = 5, 1 \ \Omega \tag{3.21}$$

In der Gleichung 3.22 ist die Berechnung für den Off-Set des Parameters 40G/Center X dargestellt. Der Wert für die transiente Reaktanz des Generators ist aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$Center_{XZ2} = -\frac{X'_{Gd}}{2} = -\frac{4,56 \ \Omega}{2} = -2,28 \ \Omega \tag{3.22}$$

In der Gleichung 3.23 ist die Berechnung für den Radius des Parameters 40G/Radius dargestellt. Der Wert für die Reaktanz des Generators ist aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$Radius_{Z2} = \frac{X_{Gd}}{2} = \frac{301 \ \Omega}{2} = 150, 5 \ \Omega \tag{3.23}$$

3.3.8.3 Parameterwerte 40G.2

In der Tabelle 3.10 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
40G.2	Untererregung MHO 3 -phasig (Zone 2)	40G.2/Mittelpunkt R (<i>Center</i> _{RZ2}) (Stufe2)	5,15	5,2	Ω	Verschiebung des Kreises R _{GS} / 2 in R Richtung
40G.2/Mittelpunkt X (<i>Center</i> _{XZ2}) (Stufe2)		-2,28	-2,3	Ω	Offset des Impdanzkreises ist der selbe wie bei Stufe 1	
		40G.2/Radius (<i>Radius</i> ₂₂) (Stufe2)	150,5	150,5	Ω	Radius des MHO Kreises (X d / 2)
		40G.2/Auslösezeit (Stufe2)	0,3	0,3	s	0,1 laut Norm + 0,2 wegen Redundanz zu 51G
		40G.2/Rückfallzeit (Stufe2)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,08	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	178	mA	von 110 V zu erhalten	
ohm	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	150,5	Ω	

Tabelle 3.10: Parameter der Schutzfunktion 40G.2, Untererregungsschutz

3.3.8.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 40G.2

In der nachfolgenden Abbildung 3.8 ist das Impedanzdiagramm mit der Nennlast aus Kapitel 3.2.2, der Grenzlinien aus den Parametern der Zone 1 (Kapitel 3.3.7) und der Zone 2 (Kapitel 3.3.8) dargestellt. Auf der Abszisse befindet sich der Realteil der Impedanz und auf der Ordinate der Imaginärteil. Die Nennlast ist mit einem grünen Punkt gekennzeichnet und zeigt deren Position im Diagramm. Mit einem roten Kreis wird die Grenze für den Anrege- und den Auslösewert für die Zone 1 und mit einem gelben Kreis wird die Grenze für den Anrege- und den Auslösewert für die Zone 2 dargestellt. Jeder Impedanzwert, welcher im Inneren der Kreise liegt, gehört zur Anrege- bzw. Auslösezone. Zone 1 wird von den Parametern der Schutzfunktion 40G.1 und Zone 2 wird von den Parametern der Schutzfunktion 40G.2 eingegrenzt. Da die Werte des Offsets der Parameter sehr klein sind im Vergleich zum Radius der Kreise, ist diese Verschiebung in der Grafik kaum zu erkennen.



Abbildung 3.8: Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 40G.1 und 40G.2 als Kreise im Impedanzdiagramm

3.3.9 Schutzfunktion 46G, Schieflast

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14]

3.3.9.1 Theorie 46G

Die Schutzfunktion 46G überwacht mittels Strommessung alle drei Stränge und kann eine unsymmetrische Belastung, also eine Schieflast erkennen. Die Schutzfunktion errechnet sich den Gegensystem-Strom I_2 . Da es für den Generator aus dem Laboraufbau diesen Wert vom Hersteller nicht gibt, wird auf Standardwerte aus der IEEE Std C37.102TM-2006[14] zurückgegriffen. Dort wird der Gegensystem-Strom I_2 für einen Schenkelpolgenerator als 10% des Nennstromes definiert. Sollte die Schieflast diesen Wert überschreiten, wird die Funktion angeregt und nach dem Ablaufen der Auslösezeit wird ein Schaltsignal zum Leistungsschalter gesendet. Auch eine falsche Phasenfolge, z.B. durch eine falsch drehende Turbine, wird von dieser Funktion als Schieflast erkannt, wenn der Nennstrom zu fließen beginnt. Die Kurzzeitbelastung wird über den Wert $I_2^2 t = K$ ausgedrückt und hat laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] den Wert K = 40 für einen Schenkelpolgenerator. Der Wert von K = 40 liefert, laut Diagramm in dem IEEE Std C37.102TM-2006[14], eine viel zu hohe Auslösezeit von 500 s, weshalb für den Laborversuch ein typischer Wert aus der Praxis von K = 10 mit einer Auslösezeit von 8 Sekunden gewählt wurde. Diese typischen Werte sind dem IEEE Std C37.102TM-2006[14] zu entnehmen.

3.3.9.2 Berechnungen 46G

In der Gleichung 3.24 ist die Berechnung für den Gegensystem-Strom des Parameters 46G/Anregewert dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Nennstromes I_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$I_2 = I_N \cdot 10\% = 0,072 \text{ A} \cdot 0,1 = 0,007 \text{ A}$$
 (3.24)

3.3.9.3 Parameterwerte 46G

In der Tabelle 3.11 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
46G	Schieflast	46G/Anregewert (I ₂)	0,007	0,007	А	$I_2 = 10\%$ des Nennstromes ist der Anregewert
		46G/Auslösezeit	8	8	s	500 s Zeitverzögerung (Figure 4- 41b) K=40 Zu viel Zeit, typischer Wert ist 8 s by K=10
		46G/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller.
		46G/Anregeverzöger ung	0,4	0,4	s	Standardwert vom Hersteller.
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,08	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	178	mA	von 110 V zu erhalten	
ohm	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	622,4	Ω	

Tabelle 3.11: Parameter der Schutzfunktion 46G, Schieflast

3.3.10 Schutzfunktion 49G, Überlast

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.10.1 Theorie 49G

Die Schutzfunktion 49G ist eine Überlast-Funktion und soll laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] beim Überschreiten des Parameters **49G/Freigabestrom**, welcher über 150% des maximalen Laststroms entspricht, anregen und nach Ablaufen der Zeit des Parameters **49G/49G/Zeitkonstante** ein Signal zum Leistungsschalter senden, um ein Wegschalten des Generators vom Fehler zu erreichen.

Da beim Generatormodell aus dem Laboraufbau keine Temperaturmessung möglich ist, wurden die dafür vorgesehenen Parameter mit den Standardwerten des Herstellers übernommen und der Temperatureingang am Schutzgerät nicht zugewiesen. Damit wird jetzt nur noch der Strom aller 3 Phasen überwacht und die Überlast über den Stromfluss bestimmt. Mittels der Temperaturmessung würde eine Überlastung zusätzlich auch über die Erwärmung des Generators feststellbar sein. Beim Überschreiten der Temperatur-Parameter des Schutzgerätes würden eine Anregung und danach eine Auslösung erfolgen.

3.3.10.2 Berechnungen 49G

In der nachfolgenden Gleichung 3.25 ist die Berechnung für den Überstrom des Parameters 49G/Freigabestrom dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Stromes bei maximaler Last I_{full} aus Tabelle 3.2 entnommen.

$$I_{\text{Freigabe49}} = I_{\text{full}} \cdot 150\% = 0,094 \text{ A} \cdot 1,5 = 0,141 \text{ A}$$
 (3.25)

3.3.10.3 Parameterwerte 49G

In der nachfolgenden Tabelle 3.12 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
49G	Überlast 3-phasig	49G/Freigabestrom (I _{Freigabe49})	0,141	0,14	А	150 % des Stromes bei maximaler Last
		49G/Anregewert Belastung	80	80,00	К	Standardwert vom Hersteller
		49G /Auslosewert Belastung	100	100	K	Standardwert vom Hersteller
		49G/Nennstrom	0,07	0,07	А	Nennstrom des zu schützenden Objektes
		49G/Zeitkonstante	30,00	1000	s	min. Wert zu wählen ist 30s, für die thermische Kurzzeitbelastung der Ankerwicklung
		49G/Alt. Zeitkonstante	1000	1000	s	Nicht in Verwendung. Standardwert vom Hersteller
		49G/Grenzwert Belastung	100	100	K	Standardwert vom Hersteller
		49G/Initialisierungsw ert Bel.	0	0,00	K	Standardwert vom Hersteller
		49G/Temperaturvorg abe	18	18,00	K	Standardwert vom Hersteller
		49G/Rückfallzeit	0,1	0,10	s	Standardwert vom Hersteller
einstell	einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		_	19,25	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	225	mA	von 110 V zu erhalten	
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	450,9	Ω	

Tabelle 3.12: Parameter der Schutzfunktion 49G, Überlast 3-phasig

3.3.11 Schutzfunktion 50BF, Schaltversager

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14]

3.3.11.1 Theorie 50BF

Die Schutzfunktion 50BF soll erst aktiv werden, wenn ein Schaltversager vorliegt, das heißt ein Leistungsschalter, der angesteuert wird und nicht öffnet, um den Fehler zu klären. Als Anregeparameter wird laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] der niedrigste Strom, der im Fehlerfall über den zu überwachenden Leistungsschalter zum Fließen kommt, gewählt.

Wenn keine Abschaltung erfolgt, wird eine digitale Rückmeldung vom Leistungsschalter an das Schutzgerät geschickt. Mit der Zuweisung des Einganges zu einer Blockierung der Funktion wird sichergestellt, dass diese Schutzfunktion erst jetzt aktiv wird. Bevor es zu einer Anregung kommt, muss die Überwachungszeit ablaufen, welche über die Zykluszeit des Gerätes und eine bestimmte Anzahl an zu verstreichenden Zyklen ermittelt wird. Dies soll Fehlauslösungen vorbeugen. Die Auslösezeit von 0,1 s beginnt erst nach dieser Überwachungszeit abzulaufen. Diese Ermittlung der Überwachungszeit und die Dauer der Auslösezeit werden im IEEE Std C37.102[™]-2006[14] vorgeschlagen.

3.3.11.2 Berechnungen 50BF

In der Gleichung 3.26 ist die Berechnung für den Strom des Parameters **50BF/Anrege**wert Strom dargestellt. Es wird für die Ermittlung des niedrigsten Stromes im Fehlerfall eine Minimum-Funktion von Excel verwendet. Diese sucht sich den Minimalwert aus allen relevanten Fehlerströmen heraus.

$$I_{50BF} = MIN(alle Fehlerströme) = 0,007 A$$
 (3.26)

In der Gleichung 3.27 ist die Berechnung für die Zeit des Parameters **50BF**/Überwachungszeit dargestellt. Die Überwachungszeit berechnet sich aus der Zykluszeit des Gerätes und einer bestimmten Anzahl an zu verstreichenden Zyklen. Die Zykluszeit ist im Menüpunkt Task 2 im Menü "Schutz" im Untermenü "Allgemeines" im Reiter "Allgemeine Einstellungen Schutz" des Schutzgerätes zu finden und beträgt 15 ms. Die Anzahl der zu verstreichenden Zyklen wird laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] mit 9 empfohlen.

$$t_{50BF} = 15 \text{ ms} \cdot 9 = 135 \text{ ms} = 0,135 \text{ s}$$
 (3.27)

3.3.11.3 Parameter 50BF

In der Tabelle 3.13 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
50BF	Schaltversager	50BF/Anregewert Strom (I _{50BF})	0,007	0,01	А	Niedrigster Stromwert während eines Fehlers
51		50BF/Überwachungs zeit (t _{50BF})	0,135	0,14	s	9 Zyklen multipliziert mit 15 ms Wert Task 2 aus den Einstellungen
		50BF/Auslösezeit	0,1	0,1	s	Ausgewählt
		50BF/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,08	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	178	mA	von 110 V zu erhalten	
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	450,9	Ω	

Tabelle 3.13: Parameter der Schutzfunktion 50BF, Schaltversager

3.3.12 Schutzfunktion 51G.1, Überstrom 3-phasig

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.12.1 Theorie 51G.1

Diese Schutzfunktion ist ein Überstromschutz. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden und einen höheren Schutz zu gewährleisten, empfiehlt der IEEE Std C37.102TM-2006[14], diese Schutzfunktion in zwei Stufen zu unterteilen. Stufe 1 wird als Schutzfunktion 51G.1 definiert und soll dann anregen bzw. sofort auslösen, wenn der Stromwert I_{full} , der Strom bei maximaler Last, um 224,5% überschritten wird. Diesen Prozentwert erhält man aus dem IEEE Std C37.102TM-2006[14]. Dort wird für den Parameter **51G**/**Anregewert (Stufe 1)** definiert, dass 115% des Stromes I_{full} für die Anregung gilt. Da der Parameter des Schutzgerätes für die sofortige Auslösung konzipiert ist, muss dieser Wert von 115% zusätzlich um 95% höher gewählt werden. Anstelle der Sofortauslösung wird eine Auslösezeit von 0,1 Sekunden gewählt, damit der Abstand zwischen Anregung und Auslösung ersichtlich ist. Stufe 2 wird im Kapitel 3.4.4 erläutert.

3.3.12.2 Berechnungen 51G.1

In der Gleichung 3.28 ist die Berechnung für den Strom des Parameters 51G/Anrege-wert (Stufe 1) dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Stromes bei maximaler Last I_{full} aus Tabelle 3.2 entnommen.

 $I_{51\text{G1}} = (I_{\text{full}} \cdot 115\%) \cdot 195\% = (0,094 \cdot 1,15) \cdot 1,95 = 0,211 \text{ A}$ (3.28)

3.3.12.3 Parameterwerte 51G.1

In der Tabelle 3.14 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
51G.1	Überstrom 3- phasig	51G/Anregewert (Stufe 1) (I_{51G1})	0,211	0,21	A	115% des Stromes I _{full} bei maximaler Last für die Anregung und um 95% des Anregewertes oder mehr für die sofortige Auslösung erhöhen
51G/Stromme (Stufe 1)		51G/Strommessung (Stufe 1)	RMS	RMS	-	Ausgewählt
		51G/Oberwellen- erfassung (Stufe 1)	Off	Off	-	Ausgewählt
		51G/2nd Harmonische (Stufe 1)	25	25	%	Nicht in Verwendung. Standardwert vom Hersteller
		51G/Zeitstufe (Stufe 1)	phase	phase	-	Ausgewählt
		51G/Auslösezeit (Stufe 1)	0,1	0,1	s	Unverzögert 0,1s
		51G/Rückfallzeit (Stufe 1)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	15,02	V	Eingestellt, um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	174	mA	von 110 V zu erhalten	
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	0,1	Ω	

Tabelle 3.14: Parameter der Schutzfunktion 51G.1, Überstromschutz 3-phasig

3.3.13 Schutzfunktion 59G.1, Überspannung

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE St
d $\rm C37.102^{TM}\text{-}2006[14]$

3.3.13.1 Theorie 59G.1

Der Überspannungsschutz soll den Generator vor zu hoher Spannung schützen. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden und einen höheren Schutz zu gewährleisten, empfiehlt der IEEE Std C37.102[™]-2006[14], diese Schutzfunktion in zwei Stufen zu unterteilen. Die Schutzfunktion 59G.1 wird als erste Stufe definiert und soll nach 10 bis 15 Sekunden über 110% der Nennspannung den Generator vom Netz nehmen. Somit hat die Maschine Zeit, wieder in den zugelassenen Spannungsbereich zu kommen, ohne sofort auszulösen. Um die maximale Sicherheit des Generators zu gewährleisten, wurde eine Zeit von 10 Sekunden gewählt. Stufe 2 wird im Kapitel 3.3.14 erläutert.

3.3.13.2 Berechnungen 59G.1

In der nachfolgenden Gleichung 3.29 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **59G/Anregewert Spannung (Stufe 1)** dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert der gemessenen Nennspannung $U_{\rm N}$ aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$U_{59G1} = U_{\rm N} \cdot 110\% = 110 \,{\rm V} \cdot 1, 1 = 121 \,{\rm V} \tag{3.29}$$

3.3.13.3 Parameterwerte 59G.1

In der nachfolgenden Tabelle 3.15 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
59G.1	Überspannung 3- phasig	59G/Anregewert Spannung (U_{59G1}) (Stufe 1)	121	121	v	Mindestwert für Anregung bei 110% Nennspannung
		59G/Auslösezeit (Stufe 1)	10	10	s	Zeitverzögerung von 10 s bis 15 s
		59G/Rückfallzeit (Stufe 1)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	17,00	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	199	mA	von 121 V zu erhalten	
	ohmsch fixer Wid	lerstand	-	903,5	Ω	

Tabelle 3.15: Parameter der Schutzfunktion 59G.1, Überspannungsschutz 3-phasig

3.3.14 Schutzfunktion 59G.2, Überspannung

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE St
d $\rm C37.102^{TM}\text{-}2006[14]$

3.3.14.1 Theorie 59G.2

Der Überspannungsschutz soll den Generator vor zu hoher Spannung schützen. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden und einen höheren Schutz zu gewährleisten, empfiehlt der IEEE Std C37.102[™]-2006[14], diese Schutzfunktion in zwei Stufen zu unterteilen. Die Schutzfunktion 59G.2 wird als zweite Stufe definiert und soll laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] nach dem Überschreiten von 150% der Nennspannung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit den Generator vom Netz nehmen. Die Auslösezeit berechnet sich aus der Zykluszeit des Gerätes und einer bestimmten Anzahl an zu verstreichenden Zyklen. Laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] wird die Anzahl der Zyklen für eine Überschreitung von 150% zwischen 2 und 5 empfohlen. Stufe 1 wird im Kapitel 3.3.13 erläutert.

3.3.14.2 Berechnungen 59G.2

In der Gleichung 3.30 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **59G/Anrege**wert Spannung (Stufe 2) dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert der gemessenen Nennspannung U_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$U_{59G2} = U_{\rm N} \cdot 150\% = 110 \,{\rm V} \cdot 1,5 = 165 \,{\rm V} \tag{3.30}$$

In der Gleichung 3.31 ist die Berechnung für die Zeit des Parameters **59G/Auslösezeit** (**Stufe 2**) dargestellt. Die Auslösezeit berechnet sich aus der Zykluszeit des Gerätes und einer bestimmten Anzahl an zu verstreichenden Zyklen. Die Zykluszeit ist im Menüpunkt Task 2 im Menü "Schutz" im Untermenü "Allgemeines" im Reiter "Allgemeine Einstellungen Schutz" des Schutzgerätes zu finden und beträgt 15 ms. Die Anzahl der zu verstreichenden Zyklen wird mit 5 gewählt.

$$t_{59\text{G2}} = 15 \text{ ms} \cdot 5 = 75 \text{ ms} = 0,075 \text{ s}$$
(3.31)

3.3.14.3 Parameterwerte 59G.2

In der Tabelle 3.16 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
59G.2	Überspannung 3- phasig	59G/Anregewert Spannung (U_{59G2}) (Stufe 2)	165	165	v	Generell wird der Einstellwert von 130% bis 150% der Nennspannung gewählt
		59G/Auslösezeit (Stufe 2) (t _{A59})	0,075	0,08	s	5 Zyklen multipliziert mit 15 ms. Wert vom Task 2 aus den Einstellungen
		59G/Rückfallzeit (Stufe 2)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	24,80	V	Eingestellt um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)			-	259	mA	von 165 V zu erhalten
ohmsch fixer Widerstand			-	903,5	Ω	

Tabelle 3.16: Parameter der Schutzfunktion 59G.2, Überspannungsschutz 3-phasig

3.3.15 Schutzfunktion 64G95, Überstrom 1 phasig

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14]

3.3.15.1 Theorie 64G95

Die Schutzfunktion 1-phasiger Überstrom bzw. in dieser Anwendung als Erdschlussschutz eingesetzte Schutzfunktion soll den Generator vor niederohmigen Verbindungen mit dem Erdreich und damit vor sehr hohen Überströmen schützen. Gemessen wird nur an der 1-phasigen Rückführung zum Sternpunkt des Generators. Bei diesem Laboraufbau wurde eine starre Sternpunktverbindung mit Erdpotential gewählt. Da es im IEEE Std C37.102TM-2006[14] keine konkreten Vorschläge für die Berechnung des Startwertes und auch in der Musterberechnung aus der Norm keinen Hinweis auf diese Funktion gibt, wird hier die vorgeschlagene Vorgehensweise des Experten von Andritz befolgt. Die Schutzfunktion 64G95 soll, wie in der Praxis für ein solches System üblich, beim Überschreiten des Nennstromes um 5-10% starten. Nach einer Auslösezeit von 0,1 Sekunden soll ein Signal an den Leistungsschalter gesendet werden und dieser eine Abschaltung durchführen. Um im Schutzgerät den Auslösestrom einstellen zu können, wurde ein Wert von 10% des Nennstromes gewählt.

3.3.15.2 Berechnungen 64G95

In der Gleichung 3.32 ist die Berechnung für den Wert des Parameters 64G95/Startwertdargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des Nennstromes I_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$I_{64G} = I_{\rm N} \cdot 10\% = 0,072 \,{\rm A} \cdot 0,1 = 0,007 \,{\rm A}$$
 (3.32)

3.3.15.3 Parameterwerte 64G95

In der Tabelle 3.17 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
64G95	Überstrom 1- Phasig	64G95/Startwert (I _{64G})	0,007	0,01	А	In der Praxis werden 5-10% des Nennstromes eingestellt (min. 0,01A)
		64G95/Strommess.	RMS	RMS	-	Ausgewählt
		64G95/Oberwellener- fassung	Off	Off	-	Ausgewählt
		64G95/2nd Harmonische	25	25	%	Standardwert
		64G95/Auslösezeit	0,1	0,1	s	Ausgewählt
		64G95/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,03	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)			-	175	mA	von 110 V zu erhalten
ohmsch einstellbarer + fixer Widerstand			-	0,1	Ω	

Tabelle 3.17: Parameter der Schutzfunktion 64G95, Überstromschutz 1-phasig

3.3.16 Schutzfunktion 81G.o1, Überfrequenz

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.16.1 Theorie 81G.o1

Der Überfrequenzschutz soll den Generator vom Netz nehmen, wenn die Frequenz zu hoch wird. Laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] soll die Schutzfunktion nach der Auslösezeit mit über 2% der Nennfrequenz des Generators ein Schaltsignal an den Leistungsschalter senden. Der IEEE Std C37.102[™]-2006[14] schlägt hier längere Auslösezeiten vor, aber es wurde für den Laboraufbau bewusst der kürzere Standardwert von 1 s des Schutzgerätes verwendet, damit die Messwerte im Aufnahmebereich des HIPASE-P liegen. Die Parameter Blockierung Unterspannung und Blockierung Überspannung stellen laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] die Grenzen des Bereichs dar, in denen die Funktion aktiv ist. Die Schutzfunktion ist im Bereich über der Grenze des Parameters Blockierung Überspannung und unterhalb der Grenze des Parameters Blockierung Überspannung aktiv und im Bereich außerhalb inaktiv bzw. blockiert. Da es für diese Parameter keine Empfehlung laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] gibt, werden die Standardwerte vom Hersteller des Schutzgerätes übernommen.

3.3.16.2 Berechnungen 81G.o1

In der nachfolgenden Gleichung 3.33 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **81G.o1/Anregung** dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert der gemessenen Frequenz f_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$f_{810} = f_{\rm N} \cdot 102\% = 50 \,{\rm Hz} \cdot 1,02 = 51 \,{\rm Hz}$$
 (3.33)
3.3.16.3 Parameterwerte 81G.o1

In der nachfolgenden Tabelle 3.18 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
81G.o1	Überfrequenz	81G.o1/Anregung (f ₈₁₀)	51	51	Hz	+2% der Nennfrequenz
		81G.o1/Blockierung Unterspannung	40,4	40,4	v	Standardwert vom Hersteller
		81G.o1/Blockierung Überspannung	140	140	v	Standardwert vom Hersteller
		81G.o1/Auslösezeit	1	1	s	Standardwert vom Hersteller
		81G.o1/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	15,06	V	Eingestellt um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	175	mA	von 110 V zu erhalten	
	ohmsch fixer Wie	lerstand	-	903,5	Ω	

Tabelle 3.18: Parameter der Schutzfunktion 81G.o1, Überfrequenzschutz

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.3.17 Schutzfunktion 81G.u1, Unterfrequenz

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.17.1 Theorie 81G.u1

Der Unterfrequenzschutz soll den Generator vom Netz nehmen, wenn die Frequenz zu niedrig wird. Laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] soll die Schutzfunktion 81G.u1 nach der Auslösezeit mit unter 2% der Nennfrequenz des Generators ein Schaltsignal an den Leistungsschalter senden. Die IEEE Std C37.102[™]-2006[14] schlägt hier längere Auslösezeiten vor. Es wurde für den Laboraufbau bewusst der kürzere Standardwert von 1 s des Schutzgerätes verwendet, damit die Messwerte im Aufnahmebereich des HIPASE-P liegen. Die Parameter Blockierung Unterspannung und Blockierung Überspannung stellen laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] die Grenzen des Bereichs dar, in denen die Funktion aktiv ist. Die Schutzfunktion ist im Bereich über der Grenze des Parameters Blockierung Überspannung und unterhalb der Grenze des Parameters Blockierung Überspannung aktiv und im Bereich außerhalb inaktiv bzw. blockiert. Da es für diese Parameter keine Empfehlung laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] gibt, werden die Standardwerte vom Hersteller des Schutzgerätes übernommen.

3.3.17.2 Berechnungen 81G.u1

In der nachfolgenden Gleichung 3.34 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **81G.u1/Anregung** dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert der gemessenen Frequenz f_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$f_{81u} = f_{\rm N} \cdot 98\% = 50 \; {\rm Hz} \cdot 0,98 = 49 \; {\rm Hz}$$
 (3.34)

3.3.17.3 Parameterwerte 81G.u1

In der nachfolgenden Tabelle 3.19 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
81G.u1	Unterfrequenz	81G.u1/Anregung (f _{81u})	49	49	Hz	-2% in der Nennfrequenz
		81G.u1/Blockierung Unterspannung	40,4	40,4	V	Standardwert vom Hersteller
		81G.u1/Blockierung Überspannung	140	140	v	Standardwert vom Hersteller
		81G.u1/Auslösung	1	1	s	Standardwert vom Hersteller
		81G.u1/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	15,05	V	Eingestellt, um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	175	mA	von 110 V zu erhalten	
	ohmsch fixer Wie	lerstand	-	903,5	Ω	

Tabelle 3.19: Parameter der Schutzfunktion 81G.u1, Unterfrequenzschutz

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.3.18 Schutzfunktion 87G, Generator-Differential

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] Gerhard Ziegler Digitaler Differentialschutz[20]

3.3.18.1 Theorie 87G

Die Generator-Differential-Schutzfunktion 87G schützt die Wicklungen des Generators. Sie misst die ein- und ausfließenden Ströme an jedem Ende der Wicklungen und vergleicht diese miteinander. Sollte die Schutzfunktion 87G eine Differenz messen und diese den Parameter 87G/Anregewert Differentialstrom überschreiten, wird ein Schaltsignal an den Leistungsschalter gesendet. Der Differenzwert wird laut IEEE Std C37.102TM-2006[14] als 8% vom Nennstrom I_N definiert.

Damit es bei hohen Stromflüssen zu keinen Fehlauslösungen des Schutzgerätes kommt, muss der Differentialschutz stabilisiert werden. Dafür muss man den Haltestrom-Knickpunkt 1 und 2 bestimmen. Der Parameter 87G/Haltestrom Knickpunkt 1 entspricht dem Nennstrom I_N des Systems und der 87G/Haltestrom Knickpunkt 2 wird vom Hersteller als der 4-fache Nennstrom festgelegt. Diese Knickpunkte sind als schwarze Linien in der Abbildung 3.9 gekennzeichnet. Der Haltestrom ist laut Hersteller als Mittelwert der Ströme aller verwendeten Systeme definiert und dient zur Stabilisierung bei sehr hohen Durchgangsströmen.

Auch muss die jeweilige Steigung für die drei Bereiche in den Parametern angegeben werden. Diese betragen laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] 0% für den Parameter **87G/-**Steigung Bereich 0, 10% für den Parameter **87G/Steigung Bereich 1** und 50% für den Parameter **87G/Steigung Bereich 2**. In Abbildung 3.9 werden diese Steigungen in der blauen Kennlinie dargestellt und grenzen den Anregebereich für die Schutzfunktion ein.

Da ein Stromwandler in Sättigung gehen kann, haben die Stromwandlereingänge des HIPASE-P laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] eine Sättigungserkennung, welche jede Millisekunde neu berechnet wird. Diese kann mit dem Parameter 87G/Sat. Erkenn. System1 bzw. 87G/Sat. Erkenn. System2 ein oder ausgeschaltet werden. Ist die Sättigungserkennung aktiviert, werden die Parameter für die Steigung bei Sättigung übernommen. Diese betragen 0% für den Parameter 87G/Steigung Sättigung Bereich 0, 20% für den Parameter 87G/Steigung Sättigung Bereich 1 und 60% für den Parameter 87G/Steigung Sättigung Bereich 1 und 60% für den Parameter söttigung Sättigung Bereich 1 und 60% für den Parameter Söttigung Sättigung Bereich 2 und wurden vom Hersteller des Schutzgerätes übernommen, weil im IEEE Std C37.102TM-2006[14] keine Werte für die Sättigung empfohlen werden. In Abbildung 3.9 werden diese Steigungen in der roten Kennlinie dargestellt und grenzen den Anregebereich für die Schutzfunktion bei Sätti-

gung ein.

Wird der Parameterwert **87G/Anregewert Schnellauslösung** überschritten, schaltet die Schutzfunktion automatisch auf einen höheren Messbereich in der Software um. Der Messbereich für den Parameter **87G/Anregewert Differentialstrom** für den Modus 1 A beträgt laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] 0.05 A bis 2,5 A und für **87G/Anregewert Schnellauslösung** 2 A bis 30 A.

Wenn alle diese Parameter eingestellt wurden, ist die Funktion stabilisiert. Die dadurch gebildeten Kennlinien sind in Abbildung 3.9 blau bzw. rot dargestellt.



 $\label{eq:Quelle: HIPASE-P-Applikations beschreibung [13]$

Abbildung 3.9: Differential Haltekennlinie

3.3.18.2 Berechnungen 87G

In der Gleichung 3.35 ist die Berechnung für den Wert des Parameters 87G/Anrege-wert Differentialstrom dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Nennstromes I_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$I_{87\text{diff}} = I_{\text{N}} \cdot 8\% = 0,072 \text{ A} \cdot 0,08 = 0,006 \text{ A}$$
 (3.35)

In der Gleichung 3.36 ist die Berechnung für den Wert des Parameters 87G/Anrege-wert Schnellauslösung dargestellt. Der Wert des maximalen Outputs des Fehlerstroms I_{WCout} wurde aus dem Ergebnis der Gleichung 3.5 entnommen.

$$I_{87\text{fast}} = \frac{I_{\text{WCout}}}{2} = \frac{0,486 \text{ A}}{2} = 0,243 \text{ A}$$
 (3.36)

In der Gleichung 3.37 ist die Berechnung für den Wert des Parameters 87G/HaltestromKnickpunkt 2 dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Nennstromes I_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$I_{87K2} = I_N \cdot 4 = 0,072 \text{ A} \cdot 4 = 0,288 \text{ A}$$
 (3.37)

3.3.18.3 Parameterwerte 87G

In der Tabelle 3.20 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
87G	Generator Differential 3-phasig	87G/Anregewert Differentialstrom (I _{87diff})	0,006	0,05	A	In der Praxis 1,1 % vom Nennstrom. Da dieser zu klein ist, Wert aus IEEE Standard gewählt, 8% vom Nennstrom. (0,05A is min.)
		87G/Anregewert Schnellauslösung (I _{87fast})	0,243	2,00	A	Die Hälfte des maximal möglichen Stromes (2 A min.)
		87G/Schaltgruppe System 2	VG 0	VG 0	-	Ausgewählt
		87G/Haltestrom Knickpunkt 1	0,072	0,10	А	Nennstrom (0,1A is min.)
		87G/Haltestrom Knickpunkt 2 (I _{87K2})	0,288	0,29	A	4*rated current
		87G/Steigung Bereich 0	0	0	%	laut IEEE Standard
		87G/Steigung Bereich 1	10	10	%	laut IEEE Standard
		87G/Steigung Bereich 2	50	50	%	laut IEEE Standard
		87G/Steigung Sättigung Bereich 0	0	0	%	Standardwert vom Hersteller
		87G/Steigung Sättigung Bereich 1	20	20	%	Standardwert vom Hersteller
		87G/Steigung Sättigung Bereich 2	60	60	%	Standardwert vom Hersteller
		87G/Sat. Erkenn. System1	On	On	-	Ausgewählt
		87G/Sat. Erkenn. System2	On	On	-	Ausgewählt
		87G/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
		87G/Phasenumkehr	L1-L23	L1-L23	-	Nicht in Verwendung. Standardwert vom Hersteller
einstell	bare Spannungsquel	le DC (Erregung)	-	15,06	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einst	ellbare Stromquelle	DC (Erregung)	-	175	mA	von 110V zu erhalten
	ohmsch fixer Wic	lerstand	-	903,5	Ω	

Tabelle 3.20: Parameter der Schutzfunktion 87G, Generator Differentialschutz 3-phasig

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.3.19 Schutzfunktion 94E, Mechanischer Fehler

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.19.1 Theorie 94E

Die Schutzfunktion Mechanischer Fehler bzw. Schutzfunktion 94E ist eine Funktion, welche einem digitalen Eingang des HIPASE-P zugewiesen wird. Ist laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] der Eingang aktiv, wird nach Ablaufen der Auslösezeit ein Schaltsignal an den Leistungsschutzschalter gesendet. Bei diesem Laboraufbau meldet der Digitale Eingang einen Ausfall der Erregerspannung, dieses Signal wurde aber mit einem Schalter und einem 24 VDC-Labornetzteil nachgebildet.

3.3.19.2 Berechnungen 94E

Keine Berechnungen notwendig.

3.3.19.3 Parameterwerte 94E

In der nachfolgenden Tabelle 3.21 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
94E	Mechanischer Fehler	94E/Auslösezeit	1	1	s	Standardwert vom Hersteller
94E/Rückfallzeit			0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstell	bare Spannungsquel	le DC (Erregung)	-	15,08	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)			-	176	mA	von 110 V zu erhalten
ohmsch fixer Widerstand			-	903,5	Ω	

Tabelle 3.21: Parameter der Schutzfunktion 94E, Mechanischer Fehler, Ausfall der Erregung

3.3.20 Schutzfunktion 94G, Mechanischer Fehler schnell

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

3.3.20.1 Theorie 94G

Die Schutzfunktion Mechanischer Fehler schnell bzw. Schutzfunktion 94G ist eine Funktion, welche einem digitalen Eingang des HIPASE-P zugewiesen wird. Ist laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] der Eingang aktiv, wird sofort ein Schaltsignal an den Leistungsschutzschalter gesendet. Bei diesem Laboraufbau meldet der Digitale Eingang einen Fehler vom Generator, dieses Signal wurde aber mit einem Schalter und einem 24 VDC-Labornetzteil nachgebildet.

3.3.20.2 Berechnungen 94G

Keine Berechnungen notwendig.

3.3.20.3 Parameterwerte 94G

In der nachfolgenden Tabelle 3.22 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
94G	Mechanischer Fehler Schnell	94G/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)			-	15,08	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)			-	176	mA	von 110 V zu erhalten
ohmsch fixer Widerstand			-	903,5	Ω	

Tabelle 3.22: Parameter der Schutzfunktion 94G, Mechanischer Fehler, schnelle Auslösung durch Störung am Generator

3.4 Parameterbestimmung der nicht verifizierbaren Schutzfunktionen

3.4.1 Allgemeines zur Parameterbestimmung der nicht verifizierbaren Schutzfunktionen

Die nachfolgenden Punkte sind ergänzend zum Kapitel 3.3.1 und beziehen sich auf die nicht verifizierbaren Schutzfunktionen.

Die nachfolgenden Parameter konnten nicht mit einer Messung verifiziert werden. Dies kann mehrere Gründe haben. Einer davon ist, dass die minimale Auflösung des zu einstellenden Parameters zu gering ist. Bei berechneten Werten von zwei unterschiedlichen Stufen, welche sehr nah aneinander liegen, steht nur ein Einstellwert zur Verfügung. Somit ist für zwei verschiedene Werte nur eine Parametereinstellung möglich und macht die Verwendung von zwei Stufen obsolet.

Ein anderer Grund kann sein, dass die Möglichkeit zur Erzeugung eines Anregewertes nicht umsetzbar ist.

Ein weiterer Grund ist womöglich die Betriebsart des System, wie in diesem Laboraufbau zum Beispiel, hier wurde der Inselbetrieb gewählt. Einige Schutzfunktionen können ihrer Aufgabe aber nur im Netzbetrieb des System nachkommen.

Es gibt auch Funktionen, welche nur zur Vorberechnung dienen, um diese Werte anderen Schutzfunktionen zur Verfügung zu stellen. Solche Funktionen sind selbstverständlich auch nicht mit einem Laboraufbau verifizierbar. Die nachstehenden Funktionen erfüllen eines oder mehrere dieser Kriterien.

3.4.2 Schutzfunktion 32R, Wirkleistungs Untererfassung

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

Die Messung der Schutzfunktion 32R ist nicht zu realisieren. Diese Schutzfunktion benötigt eine Verbindung mit einem starren Netz, damit sie funktioniert.

3.4.2.1 Theorie 32R

Die Wirkleistungsfunktion Untererfassung bzw. Schutzfunktion 32R überwacht die Richtung der Wirkleistung des Generators. Sollte die Wirkleistung in den Generator fließen und dieser dadurch zum Motor werden, wird nach Überschreiten des Anregewertes und Ablauf der Auslösezeit ein Schaltsignal an den Leistungsschalter gesendet. Als Anregewert sind laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] ein negativer Wert von 3-5% der Nennleistung vom Typenschild und eine typische Auslösezeit von 30 s zu wählen.

3.4.2.2 Berechnungen 32R

In der Gleichung 3.38 ist die Berechnung für den Wert des Parameters **32G/Anregewert** dargestellt. Der Wert der Nennleistung $P_{\rm N}$ kann nicht vom Typenschild übernommen werden, weil für den Generator eine neue Nennspannung und ein neuer Nennstrom definiert wurden. Die neue Nennleistung $P_{\rm Nnew}$ ist dem Ergebnis der Gleichung 3.6 zu entnehmen.

$$P_{32R} = -P_{Nnew} \cdot 5\% = -13,7 \text{ W} \cdot 0,05 = -0,7 \text{ W}$$
(3.38)

3.4.2.3 Parameterwerte 32R

In der Tabelle 3.23 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
32R	Wirkleistung Untererfassung 3- phasig	$32R/Anregewert$ (P_{32R})	-0,7	-0,7	W	Ca. 3-5% von den Nenndaten vom Typenschild, 1% kann zur Fehlauslösung führen
		32R/Auslösezeit	30	30	s	typische Einstellung 30 s
		32R/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert
		32R/Blockierzeit LS ein	1	1	s	Nicht in Verwendung.Standardwert vom Hersteller
		32R/Anrege- verzögerung	0,02	0,02	s	Anregeverzögerung ist 1 Periode
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	-	V	Eingestellt, um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	-	mA	von 110 V zu erhalten	
ohmsch fixer Widerstand			-	-	Ω	

Tabelle 3.23: Parameter der Schutzfunktion 32R, Wirkleistung Untererfassung 3-phasig

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.4.3 Schutzfunktion 50G/27, Unerwünschte Zuschaltung

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

Die Messung der Schutzfunktion 50G/27 ist nicht zu realisieren. Diese Schutzfunktion benötigt eine Verbindung mit einem starren Netz, damit sie funktioniert.

3.4.3.1 Theorie 50G/27

Die Schutzfunktion Unerwünschte Zuschaltung bzw. Schutzfunktion 50G/27 schützt vor Zuschaltung bei nicht erregtem Generator. Sie ist ein Überstromschutz und soll laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] erst aktiv sein, wenn die Nennspannung unter 50% fällt und die Anregegezeit für die Freigabe abgelaufen ist. Ist die Spannung über 50%, bleibt die Funktion für die Dauer der Rückfallzeit noch aktiv. Wird trotz einer zu geringer Spannung an den Generatorklemmen der Leistungsschalter zugeschaltet und es kommt zum Stromfluss, der den Anregewert überschreitet, wird unverzögert ausgelöst. Damit im Falle eines generatornahen Kurzschlusses keine Fehlauslösung geschieht, kann die Schutzfunktion über einen zugewiesenen digitalen Eingang des Leistungsschalters blockiert werden. Da im IEEE Std C37.102[™]-2006[14] eine Auslösezeit von 1,5 s für die Schutzfunktion 27 der Unerwünschten Zuschaltung empfohlen wird, es aber für die restlichen Zeiten keine konkreten Angaben gibt, werden hier die Standardwerte des Herstellers laut HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] übernommen.

3.4.3.2 Berechnungen 50G/27

In der Gleichung 3.39 ist die Berechnung für den Wert des Parameters 50G/27/Anregewert Strom dargestellt. Der maximale Input des Stroms des Generators I_{WCin} ist dem Ergebnis der Gleichung 3.7 zu entnehmen.

$$I_{50G} = I_{WCin} \cdot 50\% = 0,486 \text{ A} \cdot 0,5 = 0,243 \text{ A}$$
 (3.39)

In der Gleichung 3.40 ist die Berechnung für den Wert des Parameters 50G/27/Anregewert Spannung dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert der gemessenen Nennspannung U_N aus Tabelle 3.1 entnommen.

$$U_{50G} = \frac{U_{\rm N}}{\sqrt{3}} \cdot 50\% = 63,51 \,{\rm V} \cdot 0,5 = 31,75 \,{\rm V}$$
 (3.40)

3.4.3.3 Parameterwerte 50G/27

In der Tabelle 3.24 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
50G/27	Unerwünschte Zuschaltung	50G/27/Anregewert Strom (I_{50G})	0,243	0,24	А	50% des "worst case"-Stromes
		50G/27/Anregewert Spannung (U_{50G})	31,75	31,8	V	50% der Nennspannung (Phase-zu- Erde)
		50G/27/ Anregezeit Freigabe	5	5,00	s	Standardwert vom Hersteller
		50G/27/ Rückfallzeit Freigabe	3	3,00	s	Standardwert vom Hersteller
		50G/27/Rückfallzeit	0,1	0,10	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	-	V	Eingestellt, um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)		-	-	mA	von 110 V zu erhalten	
ohmsch fixer Widerstand			-	-	Ω	

Tabelle 3.24: Parameter der Schutzfunktion 50G/27, Unerwünschte Zuschaltung

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.4.4 Parameter der Schutzfunktion 51G.2, Überstrom 3-phasig

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

Die Messung der Schutzfunktion 51G.2 ist nicht zu realisieren. Dies liegt daran, dass die Ströme, die zum Fließen kommen, so gering sind, dass die berechneten Anregewerte sehr nah aneinander liegen und die möglichen Einstellwerte identisch sind. Des Weiteren würde man einen solch kleinen Stromunterschied mit dem Laboraufbau nicht zuverlässig erzeugen können.

3.4.4.1 Theorie 51G.2

Die Funktion Überstrom 3-phasig bzw. Schutzfunktion 51G.2 ist ein Überstromschutz. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden und einen höheren Schutz zu gewährleisten, empfiehlt der IEEE Std C37.102TM-2006[14], diese Schutzfunktion in zwei Stufen zu unterteilen. Stufe 2 wird als Schutzfunktion 51G.2 definiert und soll dann anregen bzw. sofort auslösen, wenn der Stromwert I_{full} um 218% überschritten wird. Der IEEE Std C37.102TM-2006[14] schlägt eine Auslösezeit von 7 Sekunden vor, damit mit dieser Stufe ein redundanter Überlastschutz gewährleistet ist. Stufe 1 wird im Kapitel 3.3.12 erläutert.

3.4.4.2 Berechnungen 51G.2

In der Gleichung 3.41 ist die Berechnung für den Strom des Parameters 51G/Anrege-wert (Stufe 2) dargestellt. Es wird für die Berechnung der Effektivwert des gemessenen Stromes bei maximaler Last I_{full} aus Tabelle 3.2 entnommen.

$$I_{51G2} = I_{\text{full}} \cdot 218\% = 0,094 \cdot 2,18 = 0,205 \text{ A}$$
 (3.41)

3.4.4.3 Parameterwerte 51G.2

In der Tabelle 3.4 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
51G.2	Überstrom 3- phasig	51G/Anregewert (I_{51G2}) (Stufe 2)	0,205	0,21	A	218% des Stromes I _{full} bei maximaler Last
		51G/Strommessung (Stufe 2)	RMS	RMS	-	Ausgewählt
		51G/Oberwellen- erfassung (Stufe 2)	Off	Off	-	Ausgewählt
		51G/2nd Harmonische (Stufe 2)	25	25	%	Nicht in Verwendung.Standardwert vom Hersteller
		51G/Zeitstufe (Stufe 2)	phase	phase	-	Ausgewählt
		51G/Auslösezeit (Stufe 2)	7	7	s	längere Zeitdauer
		51G/Rückfallzeit (Stufe 2)	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
einstellbare Spannungsquelle DC (Erregung)		-	-	V	Eingestellt, um die Klemmspannung	
einstellbare Stromquelle DC (Erregung)			-	-	mA	von 110 V zu erhalten
ohms	sch einstellbarer + fi	xer Widerstand	-	-	Ω	

Tabelle 3.25: Parameter der Schutzfunktion 51G.2, Überstromschutz 3-phasig

Die eingestellten Parameter können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.4.5 Schutzfunktion 78G, Außertrittfall

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: IEEE Std C37.102[™]-2006[14] HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[15] ELIN DRS-Funktionsbeschreibung[10]

Die Messung der Schutzfunktion 78G ist nicht zu realisieren. Diese Schutzfunktion benötigt eine Verbindung mit einem Netz, damit sie funktioniert.

3.4.5.1 Theorie 78G

Die Funktion Außertrittfallschutz bzw. Schutzfunktion 78G arbeitet nach dem "Single Blind Scheme". Dies entspricht einer Kombination aus einem Impedanzkreis mit zwei Begrenzungsgeraden, den sogenannten "Blinders". Die benötigten Werte für die Berechnungen werden an den Klemmen des Generators gemessen. Wie in Abbildung 3.10 zu erkennen ist, liegen die Begrenzungsgeraden im Impedanzkreis.

Die Auslösebedingungen dieser Funktion sind dann erfüllt, wenn die berechnete Impedanz in den durch die Parameter festgelegten Impedanzkreis von rechts eintritt, den rechten Begrenzer nach links durchschreitet, weiters den linken Begrenzer in Richtung links durchquert und den Impedanzkreis über die linke Seite verlässt. Zusätzlich muss auch die im Parameter vorgegebene Schlupfanzahl erreicht werden.

Der Schlupfzähler wird dann um eins erhöht, wenn der vollständige Durchlauf, der gerade beschrieben wurde, abgehandelt ist. Die Zählung für einen Schlupf beginnt beim erstmalige Queren des rechten "Blinders" und endet beim nächsten Durchlaufen dessen, was bereits als Beginn des zweiten Schlupfs zählt.

Um Fehlauslösungen durch Schaltvorgänge zu verhindern, gibt es noch weitere Parameter, welche die Schlupferkennung verbessern. Mit den Parametern **78G/Zeitfenster 1** und **78G/Zeitfenster 2** stellt man die Minimalzeit zwischen den "Blindern" R1 und R2 ein, welche die Schutzfunktion 78G aktiv hält. Wird dieser Zeitwert überschritten, wird die Funktion zurückgesetzt und der Anregeprozess beginnt von vorne. Der Parameter **78G/Zeitfenster 1** gilt nur für die Dauer beim ersten Schlupf und es wird üblicherweise ein höherer Wert eingestellt als beim Parameter **78G/Zeitfenster 2**. Dieser deckt alle nachfolgenden Schlupfdurchläufe ab, welche meist schneller sind als der erste Durchlauf.

Mit den Parametern **78G/Schlupfperiode 1** und **78G/Schlupfperiode 2**+ wird die Maximalzeit eingestellt, welche die Funktion ebenfalls zurücksetzt, wenn die Zeit überschritten wird. Auch hier wird es dann zu keiner Auslösung kommen. Als Schlupfperiode ist die benötigte Zeit für einen Schlupf, also vom erstmaligen Queren des "Blinders" R1 bis zum wiederholten Durchlaufen, definiert. Der Parameter **78G/Schlupfperiode 1**

wird für die Überwachung des ersten Schlupfs benötigt und **78G/Schlupfperiode 2**+ für jeden weiteren Schlupf.

Der Parameter **78G**/**Überwachungszeit T3** bietet die Einstellmöglichkeit für die Überwachung der Gesamtdauer aller Schlupfperioden. Wird diese Dauer überschritten, wird die Funktion ebenfalls zurückgesetzt.

Jede Auslösung soll unverzögert erfolgen.

3.4.5.2 Berechnungen 78G

Die nachfolgenden Berechnungen wurden anhand der Formeln aus der ELIN DRS-Funktionsbeschreibung[10] und der IEEE Std C37.102[™]-2006[14] durchgeführt.

In der Gleichung 3.42 ist die Berechnung für den Winkel des Parameters **78G/Steigung R1**|**R2** dargestellt. Es wurde für die Berechnung der Wert aus der Gleichung 3.9 entnommen.

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Im\{\underline{Z}_{\text{total}}\}}{\Re\{\underline{Z}_{\text{total}}\}}\right) = \arctan\left(\frac{93,57\Omega}{92,5\Omega}\right) = 45,329^{\circ} \tag{3.42}$$

In der Gleichung 3.43 ist die Berechnung des Parameters **78G/Fußpunkt R1** dargestellt. Es wurde für die Berechnung der Wert aus der Gleichung 3.10, der Gleichung 3.42 und der Tabelle 3.1 entnommen. Der Winkel von 30° ist in den Unterlagen der ELIN DRS-Funktionsbeschreibung[10] zu finden.

$$R_{1} = \frac{|X'_{\text{Gd}}|}{\tan(\beta)} + \frac{|\underline{Z}_{\text{total}}|}{2} \cdot \tan(30^{\circ})}{\sin(\beta)} = \frac{4,56 \ \Omega}{\tan(45,329^{\circ})} + \frac{\frac{131,57 \ \Omega}{2} \cdot \tan(30^{\circ})}{\sin(45,329^{\circ})} = 57,916 \ \Omega$$
(3.43)

In der Gleichung 3.44 ist die Berechnung für den Strom des Parameters **78G/Verschiebung R1-R2** dargestellt. Es wurden für die Berechnung die Werte aus der Gleichung 3.10 und der Gleichung 3.42 entnommen. Der Winkel von 30° ist aus den Unterlagen der ELIN DRS Funktionsbeschreibung[10].

$$R_1 - R_2 = 2 \cdot \frac{|\underline{Z}_{\text{total}}| \cdot \tan(30^\circ)}{\sin(\beta)} = 2 \cdot \frac{\frac{131,57 \ \Omega}{2} \cdot \tan(30^\circ)}{\sin(45,329^\circ)} = 106,817 \ \Omega$$
(3.44)

In der Gleichung 3.45 ist die Berechnung des Parameters **78G/Imp. Kreisdurchmesser** dargestellt. Es werden für die Berechnung die Werte aus der Gleichung 3.10 und der Tabelle 3.1 entnommen.

$$|\underline{Z}_{\rm d}| = |X'_{\rm Gd}| \cdot 3 + |\underline{Z}_{\rm TG}| \cdot 2 = |4,56\Omega| \cdot 3 + |128,37\Omega| \cdot 2 = 270,421 \ \Omega \ (3.45)$$

In der Gleichung 3.46 ist die Berechnung des Parameters **78G/Imp. Kreismittelpunkt** dargestellt. Es wurden für die Berechnung die Werte aus der Gleichung 3.10 und der Gleichung 3.45 entnommen.

$$|\underline{Z}_{\rm COff}| = -\left(\frac{|\underline{Z}_{\rm d}|}{2} - |\underline{Z}_{\rm TG}| \cdot 2\right) = -\left(\frac{270,421 \ \Omega}{2} - |128,37 \ \Omega| \cdot 2\right) = 121,531 \ \Omega$$
(3.46)

Die eingestellten Parameter in Tabelle 3.26 können von den berechneten Parametern abweichen. Das liegt daran, dass die Einstellmöglichkeit in der HIPASE-P-Software keine Einstellung in einer höheren Auflösung anbietet.

3.4.5.3 Parameterwerte 78G

In der Tabelle 3.26 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben. In den letzten drei Zeilen der Tabelle sind noch die Einstellungen für die Gleichspannungsquelle der Erregung des Generators und die Widerstände bzw. Last für die Messung angeführt. Diese Messungen werden in Kapitel 4 analysiert.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
78G	Aussertrittfall	78G/Fußpunkt R1	53,408	53,41	Ohm	Wert aus Berechnung
		78G/Verschiebung <i>R1-R2</i>	106,82	106,8	Ohm	(min. 20 Ohm)
		78G/Steigung <i>R1</i> , <i>R2</i> (β)	45,33	45,33	deg	Wert aus Berechnung
		78G/Imp. Kreisdurchmesser (Z _d)	191,7j	191,7j	Ohm	Wert aus Berechnung
		78G/Imp. Kreismittelpunkt (Z _{COff})	82,17j	82,17j	Ohm	Wert aus Berechnung
		78G/Schlupfzahl	3	3	-	Standardwert
		78G/Zeitfenster 1	0,04	0,04	s	Einstellung zwischen 40 ms und 100 ms
		78G/Schlupfperiode 1	10	10	s	Standardwert vom Hersteller
		78G/Zeitfenstert 2	0,01	0,01	s	Standardwert vom Hersteller
		78G/Schlupfperiode 2+	10	10	s	Standardwert vom Hersteller
		78G/Überwachungsze it T3	50	50	s	Standardwert vom Hersteller
		78G/ Anregemodus	Unverz.	Unverz.	-	Ausgewählt
		78G/Leistung/ Impedanz Ri.	Richt.1	Richt.1	-	Standardwert vom Hersteller
		78G/Rückfallzeit	0,1	0,1	s	Standardwert vom Hersteller
		78G/Phasenumkehr	L1-L23	L1-L23	-	v
einstell	bare Spannungsquel	le DC (Erregung)	-	-	V	Eingestellt, um die Klemmspannung
einst	ellbare Stromquelle	DC (Erregung)	-	-	mA	von 110 V zu erhalten
ohmsch fixer Widerstand			-	-	Ω	

Tabelle 3.26: Parameter der Schutzfunktion 78G, Außertrittfallschutz

3.4.5.4 Grafische Darstellung der Einstellwerte 78G

In der nachfolgenden Abbildung 3.10 ist das Impedanzdiagramm mit der Nennlast aus Kapitel 3.2.2, der roten Kreislinie aus den Parametern der Tabelle 3.26 und den "Blinders" bzw. den Begrenzungsgeraden dargestellt. Auf der Abszisse befindet sich der Realteil der Impedanz und auf der Ordinate der Imaginärteil. Die Nennlast ist mit einem grünen Punkt gekennzeichnet und zeigt deren Position im Diagramm. Der Kreis und die Begrenzungsgeraden wurden bereits im Kapitel 3.4.5.1 erläutert.



Abbildung 3.10: Darstellung der Einstellwerte im Impedanzkreis 78G

3.4.6 Parameter der Schutzfunktion Neutral End

Die Ermittlung der Parameter orientiert sich an folgenden Unterlagen: HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13]

Die Messung der Schutzfunktion Neutral End ist nicht zu realisieren. Diese Schutzfunktion ist eine mathematische Funktion, mit deren Hilfe Berechnungen durchgeführt werden.

3.4.7 Theorie Neutral End

Der Funktionsname Neutral End wurde von der Voreinstellung der Musterkonfiguration der HIPASE-P-Software von Andritz übernommen. Sie benennt eine mathematische Funktion, welche ihre Werte von dem in der Rangierung zugewiesenen Drehstromsystem erhält und mit Hilfe von Strom- und Spannungsmessungen für die nachfolgende aufgelisteten Parameter die Berechnungen durchführt. Diese Berechnungen sind die Aufbereitung für die Bestimmung von Systemwerten, welche zum Vergleich mit den eingestellten Parametern in den Schutzfunktionen dienen. Neutral End bedeutet übersetzt Sternpunkt.

Mit Hilfe dieser Funktion werden berechnet:

- Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem des Stroms
- Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem der Spannung
- Verkettete Spannung
- Übererregung V/Hz
- Frequenz
- Leistungen und Leistungsfaktor
- Impedanzen mit Winkel

3.4.7.1 Berechnungen Neutral End

Da die Berechnungen dieser Funktion von der HIPASE-P-Software durchgeführt wird, werden keine Formeln, Rechenwege oder Beispielrechnungen von dieser Funktion in dieser Arbeit dargestellt.

3.4.7.2 Parameterwerte Neutral End

In der nachfolgenden Tabelle 3.4 werden die Schutzfunktion, deren Kurzbeschreibung, die berechneten Parameterwerte und die eingestellten Parameter angeführt. Des Weiteren sind noch etwaige Kommentare zu den jeweiligen Parametern angegeben.

Schutz- Funktion	Kurzbeschreibung	Parameter	Wert ber.	Wert eing.	Einh.	Kommentar
Neutral End	Drehstrom Systemfunktion	Neutral End/Winkelkorrektur	0	0	deg	Standardwert vom Hersteller
		Neutral End/Leistung/ Impedanzrichtung.	Richt.1	Richt.1	-	Standardwert vom Hersteller
		Neutral End/Phasenumkehr	L1-L23	L1-L23	-	Standardwert vom Hersteller

Tabelle 3.27: Parameter der Schutzfunktion Neutral End

3.5 Bedienoberfläche Andritz HIPASE-P

Das Andritz HIPASE-P besitzt ein 7"-Display, mit dessen Visualisierung man schnell vor Ort einen Überblick über das Schutzgerät, das zu schützende System, die Parameter und die Messwerte gewinnen kann.

Die Bedienoberfläche wird auf das Touchpanel des HISPASE-P über die HIPASE-P-Software von Andritz hochgeladen und das Touchpanel befindet sich bei diesem Modell direkt am Gerät. Als Grundlage für die Darstellung der Touchpanel-Oberfläche für das Vor-Ort-Bedienen des Schutzgerätes dient die Musterkonfiguration der HIPASE-P-Software von Andritz.

Diese wurde an den Versuchsaufbau angepasst und um einige Schutzfunktionen bzw. Stufen der Schutzfunktionen erweitert bzw. optimiert. Auch wurden die Schutzfunktionen, welche von den Strom- und Spannungsmesspfaden sowie der mathematischen Funktion abhängig sind, farblich gekennzeichnet. Jede Schutzfunktion, die einen Stromwert benötigt, wurde mit der roten Linie verbunden, welche zum Stromwandler führt. Für die spannungsabhängigen Funktionen wurde eine Verbindung von der Funktion zum Spannungswandler mit einer blauen Linie dargestellt. Für die Schutzfunktionen, welche die Ergebnisse der mathematischen Funktion benötigen, wurde eine weiße Verbindungslinie gewählt.

In der Abbildung 3.11 sind die zuvor parametrisierten Schutzfunktionen als schwarze Vierecke mit der Nummer der jeweiligen Schutzfunktion zu erkennen, in denen ein weißer Balken die Ausreizung des parametrisierten Bereichs darstellt. Ist der weiße Balken voll ausgefüllt, wird zuerst die Anregung angesprochen (im Bild "Start", aus dem Englischen) und nach einer definierten und eingestellten Verzögerungszeit die Auslösung initiiert (im Bild "Operate", aus dem Englischen). Die Schrift der Nummer der Schutzfunktion wird im nicht angeregten Zustand in grau dargestellt, im angeregten Zustand gelb und nach der Auslösung rot angezeigt.



Abbildung 3.11: Kurzschluss angezeigt in der Visualisierung des HIPASE-P

Auf der Unterseite der Bedienoberfläche befindet sich die Menüleiste mit den verschiedenen Einstellmenüs, Messwertmenüs, der direkt dargestellten Wirk- bzw. Blindleistung und der verketten Spannung.

In Abbildung 3.11 ist auch zu erkennen, dass die Schutzfunktion 51G.1 ausgelöst hat (rote Schrift der Nummer der Funktion) und andere Funktionen bereits angeregt wurden (gelbe Schrift der Nummer der Funktion). Die Schutzfunktion 51G.1 schützt vor Überstrom und hat eine UMZ-Charakteristik. Sie reagiert bei einem Kurz- oder Erdschluss.

Alle verwendeten Schutzfunktionen und ihre dazugehörigen Parameter sind im Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 angeführt und genau beschrieben.

3.6 Zuordnung der Schutzfunktionen am HIPASE-P

In Abbildung 3.12 sind die einzelnen Schutzfunktionen, wie sie am Display des HIPASE-P für den Laboraufbau zu finden sind, dargestellt.

Türkis eingerahmt sind die Strom- und Spannungswandler bzw. die mathematische Schutzfunktion, wobei auf Grund der niedrigen Spannung des Netzes keine Spannungswandler zum Einsatz gekommen sind. Die Stromwandler haben ebenfalls ein Übersetzungsverhältnis von 1:1, weil es sonst zu Fehlmessungen kommt. Die mathematische Schutzfunktion wird nur dargestellt, um die Verknüpfung dieser mit der Strom- und Spannungsmessung zu zeigen.



Abbildung 3.12: Darstellung des Displays des HIPASE-P

Die in Rot eingerahmten Schutzfunktionen sind alle Funktionen, welche für die Anregung und/oder Auslösung den gemessenen Strom benötigen. Der in Blau gehaltene Rahmen kennzeichnet die Funktionen für die Spannungsüberwachung. In Gelb werden die Funktionen mit Abhängigkeit der Frequenz markiert und in Weiß jene, die sich an der Impedanz orientieren. In Violett sind die Schutzfunktionen eingerahmt, die von externen digitalen Signalen angesteuert werden, und jene in Ocker sind die, welche leistungsabhängig sind. Zusammengefasst kann man erkennen, dass es acht stromabhängige, fünf impedanzabhängige, vier spannungsabhängige, drei frequenzabhängige, zwei von einem Digitaleingang abhängige und eine leistungsabhängige Schutzfunktion gibt.

4 Laborauswertung des Andritz HIPASE-P

4.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Schaltpläne zeigen die Anordnung der Geräte des Laboraufbaus mit den zuschaltbaren Lasten für die Messungen.

Um den Generator in Betrieb zu nehmen, muss man zuerst die "Turbine" über ein Stellrad an der Steuereinheit des Servomotors auf Nenndrehzahl bringen und dann schaltet man mit dem Leistungsschalter CB 2 die Erregung dazu. Der genaue Laboraufbau wird im Kapitel 3.1 erläutert. Nach der Inbetriebnahme des Generators wird mit dem Leistungsschalter CB 1 der Blocktransformator und mit CB 3 die Nennlast zugeschaltet. Mit dem Leistungsschalter CB 4 wird eine variable Last von 0,1 bis 2000 Ω in das System eingebracht, welche je nach benötigter Situation für die Schutzfunktion als eine Lasterhöhung oder ein Fehler dienen kann.

Für die nachfolgenden Messungen werden nur ohmsche Widerstände als Lasten verwendet. Obwohl in einem Realen System Lasten mehrheitlich induktiv sind, wird zur Erleichterung des Laboraufbaus und der Verifizierung im Rahmen dieser Arbeit nur auf eine fixe und eine variable ohmsche Last zurückgegriffen. Dieser Punkt wird im Kapitel 6 genauer beleuchtet.

Die Fehler werden im Normalbetrieb, das heißt im Inselbetrieb mit Nennlast zugeschaltet. Dabei werden die Messwerte im Fehlerfall aufgenommen und mittels MATLAB grafisch ausgewertet. Die Darstellung sämtlicher Werte in diesen Grafiken geschieht im Per-Unit-System und basiert auf dem definierten Nennstrom und der Nennspannung wie in Kapitel 3.2.1 angeführt. Die Aufnahmezeit des HIPASE-P beträgt 5 Sekunden vor und 2 Sekunden nach dem Auslösen bei zugeschaltetem Fehler.

Beim Generator wird immer für die Versuche die Erregerspannung fest eingestellt. Diese Werte sind dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.

Die Definition von Anregung und Auslösung wird im Kapitel 3.3.1 erläutert.

4.2 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 21G.1, Impedanzschutz

4.2.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

In Abbildung 4.1 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 21G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.



Abbildung 4.1: Variable Last als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet

4.2.1.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.1 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 98,0~\Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an jede Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand pro Phase an.

$$|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| = = |\frac{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) \cdot 98, 0\ \Omega}{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) + 98, 0\ \Omega}| = 89, 28\ \Omega$$
(4.1)

4.2.2 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.2.3 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.2, Abbildung 4.3, Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.2 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Um eine Auslösung dieser Schutzfunktion zu garantieren, musste für diese Messung die Auslösezeit von 0,5 Sekunden auf 0,2 Sekunden reduziert werden, damit andere redundante Funktionen nicht zuvor kommen.

Der Parameterwert der Schutzfunktion lässt sich nur dadurch gezielt unterschreiten, dass man die variable Last vor dem Blocktransformator zuschaltet.

In Abbildung 4.3 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird, bis der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.4 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.

In Abbildung 4.5 ist der Verlauf der Impedanz dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennimpedanz an den Generatorklemmen anliegt. Dann sieht man den Einbruch der Impedanz ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird. Die Impedanz wird im Schutzgerät berechnet und über die integrierte Analyse-Software ausgegeben.

Die Einstellungen der Parameter, des Erregerstroms, der Erregerspannung und der Impedanz sind dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.



115



Abbildung 4.3: Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.4: Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Strom



Abbildung 4.5: Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Impedanz
4.3 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 21G.2, Impedanzschutz

4.3.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

In Abbildung 4.6 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 21G.2 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.



Abbildung 4.6: Variable Last als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet

4.3.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.2 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 180,0~\Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an jede Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand pro Phase an.

$$|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| =$$

$$= |\frac{(903, 5 \ \Omega + (92, 5 + j89, 01) \ \Omega) \cdot 180, 0 \ \Omega}{(903, 5 \ \Omega + (92, 5 + j89, 01) \ \Omega) + 180, 0 \ \Omega}| = 152, 62 \ \Omega$$
(4.2)

4.3.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.3.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so unterschreitet das System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.7, Abbildung 4.8, Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.7 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Um eine Auslösung dieser Schutzfunktion zu garantieren, musste für diese Messung die Auslösezeit von 1 Sekunden auf 0,1 Sekunden reduziert werden, damit andere redundante Funktionen nicht zuvor kommen.

Der Parameterwert der Schutzfunktion lässt sich nur dadurch gezielt unterschreiten, dass man die variable Last vor dem Blocktransformator zuschaltet.

In Abbildung 4.8 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird, bis der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.9 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.

In Abbildung 4.10 ist der Verlauf der Impedanz dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennimpedanz an den Generatorklemmen anliegt. Dann sieht man den Einbruch der Impedanz ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird. Die Impedanz wird im Schutzgerät berechnet und über die integrierte Analyse-Software ausgegeben.





Abbildung 4.8: Auswertung der Schutzfunktion 21G.2 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.9: Auswertung der Schutzfunktion 21G.2 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Strom



Abbildung 4.10: Auswertung der Schutzfunktion 21G.2 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Impedanz

4.4 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 24G, Übererregung

4.4.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

In Abbildung 4.11 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 24G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Erhöhung der Erregerspannung.



Abbildung 4.11: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe

4.4.1.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet. Der Fehler wird über die einstellbare DC-Quelle erzeugt.

4.4.2 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.4.3 Erkenntnis

Wird die Erregung erhöht, überschreitet das Spannungs-Frequenz-Verhältnis den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.12, Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt gegen null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.12 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

In Abbildung 4.13 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Spannung ansteigt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.14 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Strom steigt. Das wird daran liegen, dass die Spannung steigt, aber die Last gleich bleibt.



4.4 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 24G, Übererregung



Abbildung 4.13: Auswertung der Schutzfunktion 24G Übererregung, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.14: Auswertung der Schutzfunktion 24G Übererregung, gesamter Messbereich Strom

4.5 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 27G.1, Unterspannungsschutz

4.5.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

In Abbildung 4.15 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 27G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Verringerung der Erregerspannung.



Abbildung 4.15: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe

4.5.1.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast $\underline{Z}_{\text{Load}}$ zugeschaltet. Der Fehler wird über die einstellbare DC-Quelle erzeugt.

4.5.2 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.5.3 Erkenntnis

Wird die Erregung verringert, unterschreitet der Spannungswert an den Generatorklemmen den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.16, Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.16 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Eine Unterschreitung der Nennspannung von 90% führt zur Anregung der Schutzfunktion und nach einer dauerhaften Unterschreitung von 10 Sekunden erfolgt die Auslösung. Da die Auslösezeit länger ist als die Fehleraufnahmezeit des HIPASE-P, ist die Anregung am Beginn der Aufzeichnungen bereits aktiv.

In Abbildung 4.17 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Spannung unter dem Nennwert liegt. Dann sieht man den Spannungsanstieg ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.14 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Strom unter dem Nennwert liegt. Das wird daran liegen, dass die Spannung kleiner ist, aber die Last gleich bleibt.





Abbildung 4.17: Auswertung der Schutzfunktion 27G.1 Unterspannung, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.18: Auswertung der Schutzfunktion 27G.1 Unterspannung, gesamter Messbereich Strom

4.6 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 27G.2, Unterspannungsschutz

In Abbildung 4.19 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 27G.2 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Verringerung der Erregerspannung.



4.6.0.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.19: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe

4.6.1 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet. Der Fehler wird über die einstellbare DC-Quelle erzeugt.

4.6.2 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.6.3 Erkenntnis

Wird die Erregung verringert, unterschreitet der Spannungswert an den Generatorklemmen den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.20, Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.16 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Eine Unterschreitung der Nennspannung von 80% führt zur Anregung der Schutzfunktion und nach einer dauerhaften Unterschreitung von 2 Sekunden erfolgt die Auslösung. Hier ist die Auslösezeit nicht länger als die Fehleraufnahmezeit des HIPASE-P, daher ist der Beginn der Anregung der Aufzeichnungen gut zu erkennen.

In Abbildung 4.21 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Spannung schnell abfällt. Dann sieht man den Spannungsanstieg ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.22 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Strom schnell sinkt. Das wird daran liegen, dass die Spannung schnell sinkt, aber die Last gleich bleibt.



4.6 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 27G.2, Unterspannungsschutz



Abbildung 4.21: Auswertung der Schutzfunktion 27G.2 Unterspannung, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.22: Auswertung der Schutzfunktion 27G.2 Unterspannung, gesamter Messbereich Strom

4.7 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 32R, Wirkleistungs Untererfassung

Die Schutzfunktion 32R ist eine Funktion, die nur in Verbindung mit einem Netzanschluss ihre Aufgabe erfüllen kann. Da der Laboraufbau als Inselbetrieb definiert wurde, sind keine Messdaten aufgenommen oder analysiert worden.

4.8 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 40G.1, Untererregung MHO

In Abbildung 4.23 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 40G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.

4.8.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers



Abbildung 4.23: Ohmscher Widerstand als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet

4.8.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.3 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 420,0 \ \Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an jede Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand pro Phase an.

$$|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| =$$

$$= |\frac{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) \cdot 420, 0\ \Omega}{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) + 420, 0\ \Omega}| = 296, 02\ \Omega$$
(4.3)

4.8.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.8.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.24, Abbildung 4.25, Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.24 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Um eine Auslösung dieser Schutzfunktion zu garantieren, musste für diese Messung die Auslösezeit von 0,7 Sekunden auf 0,1 Sekunden reduziert werden, damit andere redundante Funktionen nicht zuvor kommen.

Der Parameterwert der Schutzfunktion lässt sich nur dadurch gezielt unterschreiten, dass man die variable Last vor dem Blocktransformator zuschaltet.

In Abbildung 4.25 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird, bis der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.26 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten

und den transienten Kurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird. Bevor sich der Dauerkurzschlussstrom Einpendeln konnte, wurde abgeschaltet.

In Abbildung 4.27 ist der Verlauf der Impedanz dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennimpedanz an den Generatorklemmen anliegt. Dann sieht man den Einbruch der Impedanz ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird. Die Impedanz wird im Schutzgerät berechnet und über die integrierte Analyse-Software ausgegeben.





Abbildung 4.25: Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.26: Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, gesamter Messbereich Strom



Abbildung 4.27: Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, gesamter Messbereich Impedanz

4.9 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 40G.2, Untererregung MHO

In Abbildung 4.28 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 40G.2 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.



4.9.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.28: Ohmscher Widerstand als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet

4.9.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.4 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 177,0~\Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an jede Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand pro Phase an.

$$|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| = = |\frac{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) \cdot 177, 0\ \Omega}{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) + 177, 0\ \Omega}| = 150, 46\ \Omega$$

$$(4.4)$$

4.9.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.9.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.29, Abbildung 4.30, Abbildung 4.31 und Abbildung 4.32 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.29 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Um eine Auslösung dieser Schutzfunktion zu garantieren, musste für diese Messung die Auslösezeit von 0,3 Sekunden auf 0,2 Sekunden reduziert werden, damit andere redundante Funktionen nicht zuvor kommen.

Der Parameterwert der Schutzfunktion lässt sich nur dadurch gezielt unterschreiten, dass man die variable Last vor dem Blocktransformator zuschaltet.

In Abbildung 4.30 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird, bis der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.31 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.

In Abbildung 4.32 ist der Verlauf der Impedanz dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennimpedanz an den Generatorklemmen anliegt. Dann sieht man den Einbruch der Impedanz ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird. Die Impedanz wird im Schutzgerät berechnet und über die integrierte Analyse-Software ausgegeben.





Abbildung 4.30: Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.31: Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, gesamter Messbereich Strom


Abbildung 4.32: Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, gesamter Messbereich Impedanz

4.10 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 46G, Schieflast, 1-phasig belastet

In Abbildung 4.33 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 46G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.

4.10.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers



Abbildung 4.33: Ohmscher Widerstand als Fehler nach dem Blocktransformator zugeschaltet

4.10.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.5 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 2000, 0 \ \Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Da bei diesem Versuch nur eine Phase belastet wird, wurden zwei variable Widerstände in Serie geschaltet und jeweils auf 1000, 0 Ω eingestellt, um einen $\underline{Z}_{\rm var}$ von

2000, 0 Ω zu erhalten. Die Impedanz der variablen Last wird an einer Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz $|\underline{Z}_{\rm Load-new}|$ den Widerstand dieser Phase an. Die beiden anderen Phasen bleiben mit der Nennlast beschaltet.

$$\begin{aligned} |\underline{Z}_{\text{Load-new}}| &= |\frac{\underline{Z}_{\text{Load}} \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{var}}}| &= \\ &= |\frac{903, 5 \ \Omega + 2000, 0 \ \Omega}{903, 5 \ \Omega + 2000, 0 \ \Omega}| = 622, 35 \ \Omega \end{aligned}$$
(4.5)

4.10.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.10.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 1-phasig zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.34, Abbildung 4.35 und Abbildung 4.36 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.34 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Unterschreitet bei Schieflast der Messwert den berechneten Parameterwert länger als 8 Sekunden, wird die Auslösung erreicht. Da die Auslösezeit länger ist als die Fehleraufnahmezeit des HIPASE-P, ist die Anregung am Beginn der Aufzeichnungen bereits aktiv.

In Abbildung 4.35 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird, die Spannung auf das Leerlaufniveau ansteigen.

In Abbildung 4.36 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass in Phase 2 und Phase 3 der Nennstrom fließt. In Phase 1 fließt 20% mehr als der

Nennstrom und das über 8 Sekunden. Diese Unsymmetrie führt zur Auslösung.





Abbildung 4.35: Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.36: Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Strom

4.11 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 46G, Schieflast, Drehrichtung der Turbine

In Abbildung 4.37 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 46G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die falsch eingestellte Drehrichtung der Turbine und das Zuschalten des Generators in das Inselnetz.

4.11.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers



Abbildung 4.37: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler durch gegensinnige Turbinendrehrichtung

4.11.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast $\underline{Z}_{\text{Load}}$ zugeschaltet. Der Fehler wird durch das Hochfahren mit einer

falschen Drehrichtung erzeugt.

4.11.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.11.4 Erkenntnis

Wird die Nennlast 3-phasig zugeschaltet, so überschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion von Beginn an und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.38, Abbildung 4.39 und Abbildung 4.40 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.38 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Durch die falsche Drehrichtung der Turbine und die symmetrische Last wird nur ein Gegensystem erzeugt. Sobald der Generator zur Last geschaltet wird, ist der berechnete Parameterwert für den Strom des Gegensystems überschritten und die Schutzfunktion regt an. Da die Auslösezeit länger ist als die Fehleraufnahmezeit des HIPASE-P, ist die Anregung am Beginn der Aufzeichnungen bereits aktiv.



164



Abbildung 4.39: Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.40: Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Strom

4.12 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 49G, Überlast

In Abbildung 4.41 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 49G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.





Abbildung 4.41: Ohmscher Widerstand als Fehler nach dem Blocktransformator zugeschaltet

4.12.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.6 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 900, 0 \ \Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an jede Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand pro Phase an.

$$\begin{aligned} |\underline{Z}_{\text{Load-new}}| &= |\frac{\underline{Z}_{\text{Load}} \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{var}}}| &= \\ &= |\frac{903, 5 \ \Omega + 900, 0 \ \Omega}{903, 5 \ \Omega + 900, 0 \ \Omega}| &= 450, 87 \ \Omega \end{aligned}$$
(4.6)

4.12.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.12.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so überschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.42, Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44 ersichtlich, erfolgt die Anregung und die Auslösung gleichzeitig. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.42 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Da der Generator aus dem Laboraufbau keine kontinuierliche Temperaturmessung ermöglicht, konnten die eingestellten Parameterwerte für die Temperaturüberwachung nicht verifiziert werden. Aus zeitlichen Gründen wurden diese auch nicht mit Signalgeber nachgestellt. Durch die fehlende Temperaturmessung erfolgt die Anregung zeitgleich mit der Auslösung. Die Anregung erfolgt bei dieser Funktion nur über die Temperaturmessung. Über den Strom wird die Überlast ermittelt.

Da der Parameter **49G/Zeitkonstante** 30 Sekunden beträgt, ist der Anstieg der Last nicht mehr im Aufnahmebereich des HIPASE-P. In Abbildung 4.44 sind nur die letzten 5 Sekunden vor dem Auslösen der Funktion ersichtlich. Hier fließt bereits in allen 3 Phasen der Strom der Überlast.

In Abbildung 4.43 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungsanstieg ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird. Nach etwa 0,7 Sekunden wurde von einer redundanten Schutzfunktion auch die Erregung abgeschaltet.



170



Abbildung 4.43: Auswertung der Schutzfunktion 49G 3-Phasenüberlast, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.44: Auswertung der Schutzfunktion 49G 3-Phasenüberlast, gesamter Messbereich Strom

4.13 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 50BF, Schaltversager

In Abbildung 4.45 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 50BF dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.



4.13.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.45: Variable Last als Fehler nach dem Blocktransformator zugeschaltet

4.13.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.7 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 900, 0$ Ω für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an jede Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand pro Phase an.

$$|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = |\frac{\underline{Z}_{\text{Load}} \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{var}}}| = |\frac{903, 5 \ \Omega \cdot 900, 0 \ \Omega}{903, 5 \ \Omega + 900, 0 \ \Omega}| = 450, 87 \ \Omega$$

$$(4.7)$$

4.13.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.13.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so überschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion für die Freigabe der Funktion und schaltet den Generator und die Erregung erst weg, wenn die Funktion feststellt, dass kein Leistungsschalter reagiert hat. Wie in Abbildung 4.46, Abbildung 4.47 und Abbildung 4.48 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt auf null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.46 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Für diese Verifizierung wurde der Leistungsschalter CB 1 manipuliert, so dass er nicht auslöst, nachdem er das Steuersignal erhalten hat. Dies ist in den Diagrammen dadurch zu erkennen, dass beim Auftreten des Fehlers die Spannung um ca. 20 % einbricht und die Anregung erst nach 1,5 Sekunden erfolgt. Die Zeitverzögerung ergibt sich aus der Auslösezeit der eigentlichen Schutzfunktion, welche auf den Fehler reagieren sollte, und der Addition der Überwachungszeit mit der Auslöseverzögerung der Funktion Schaltversager 50BF. Außerdem ist ein Ausklingen des Stromes zu erkennen, was dadurch erklärt werden kann, dass der Leistungsschalter CB 1 weiterhin nicht abschaltet.

Die Stromerhöhung auf 220 % in Phase 3 lässt sich dadurch erklären, dass die Last in Phase 3 höher eingestellt war. Dies dürfte beim Einstellen der variablen Last passiert sein. In den beiden anderen Phasen liegt der Strom bei dem erwarteten Wertebereich.



176



Abbildung 4.47: Auswertung der Schutzfunktion 50BF Schaltversager, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.48: Auswertung der Schutzfunktion 50BF Schaltversager, gesamter Messbereich Strom

4.14 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 50G/27, Unerwünschte Zuschaltung

Die 50G/27 ist eine Funktion, die nur in Verbindung mit einem Netzanschluss ihre Aufgabe erfüllen kann. Da der Laboraufbau als Inselbetrieb definiert wurde, sind keine Messdaten aufgenommen oder analysiert worden.

4.15 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.1, Überstrom, 1-phasiger Kurzschluss

In Abbildung 4.49 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 51G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.

4.15.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers



Abbildung 4.49: Ohmscher Widerstand als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet

4.15.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.8 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 0, 1 \Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an eine Phase des Verbrauchers zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand dieser Phase an. Die anderen Phasen bleiben mit Nennlast beschaltet.

$$\begin{aligned} |\underline{Z}_{\text{Load-new}}| &= |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| &= \\ &= |\frac{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) \cdot 0, 1\ \Omega}{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) + 0, 1\ \Omega}| &= 0, 1\ \Omega \end{aligned}$$
(4.8)

4.15.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.15.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 1-phasig zugeschaltet, so unterschreitet das System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.50, Abbildung 4.51 und Abbildung 4.52 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.50 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Beim 1-phasigen Kurzschluss bricht die Nennspannung an Phase 1 auf fast 0 V ein, während Phase 2 und Phase 3 auf ca. 35% abfallen. Der maximale Kurzschlussstrom erreicht das 17,9-Fache des Nennstromes.

In Abbildung 4.52 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.



182



Abbildung 4.51: Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 1-phasiger Kurzschluss gegen N-Leiter, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.52: Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 1-phasiger Kurzschluss gegen N-Leiter, gesamter Messbereich Spannung

4.16 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.1, Überstrom, 2-phasiger Kurzschluss

In Abbildung 4.49 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 51G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.

4.16.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Es handelt sich um den selben Aufbau wie in Abbildung 4.49.

4.16.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Es handelt sich um die selben Berechnung wie in Gleichung 4.8, nur dass hier zwei Phasen mit dem variablen Widerstand beschaltet werden.

4.16.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.16.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 2-phasig zugeschaltet, so unterschreitet das System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator und die Erregung weg. Wie in Abbildung 4.53, Abbildung 4.54 und Abbildung 4.55 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.53 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Beim 2-phasigen Kurzschluss bricht die Nennspannung an Phase 1 und 2 auf fast 12%ein, während Phase 3 auf ca. 25% abfällt. Der maximale Kurzschlussstrom erreicht das 20,3-Fache des Nennstromes.

In Abbildung 4.55 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass

am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.





Abbildung 4.54: Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 2-phasiger Kurzschluss, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.55: Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 2-phasiger Kurzschluss, gesamter Messbereich Strom

4.17 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.1, Überstrom, 3-phasiger Kurzschluss

In Abbildung 4.49 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 51G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.

4.17.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Es handelt sich um den selben Aufbau wie in Abbildung $\, 4.49.$

4.17.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Es handelt sich um die selben Berechnung wie in Gleichung 4.8, nur dass hier alle 3 Phasen mit dem variablen Widerstand beschaltet werden.

4.17.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.17.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 3-phasig zugeschaltet, so unterschreitet das System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator und die Erregung weg. Wie in Abbildung 4.56, Abbildung 4.57 und Abbildung 4.58 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.56 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Beim 3-phasigen Kurzschluss bricht die Nennspannung an allen 3 Phasen auf ca. 0Vein. Der maximale Kurzschlussstrom beträgt in Phase 2 das 21,9-Fache des Nennstromes und in Phase 1 und Phase 3 fast das 17,52-Fache.

In Abbildung 4.58 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass
am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.





Abbildung 4.57: Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 3-phasiger Kurzschluss, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.58: Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 3-phasiger Kurzschluss, gesamter Messbereich Strom

4.18 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 51G.2, Überstrom

Die Schutzfunktion 51G.2 ist eine Funktion, deren berechneter Parameterwert so nah an dem berechneten Parameterwert von 51G.1 liegt, dass das Schutzgerät sich nur auf den selben Wert einstellen lässt. Dadurch lässt sich eine differenzierte Anregung und Auslösung nicht durchführen. Darum wurde keine Verifizierung durchgeführt und keine Messdaten aufgenommen oder analysiert.

4.19 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 59G.1, Überspannung

In Abbildung 4.59 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 59G.1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Erhöhung der Erregerspannung.



4.19.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.59: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe

4.19.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet.

4.19.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.19.4 Erkenntnis

Wird die Erregung erhöht, überschreitet der Spannungswert an den Generatorklemmen den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.60, Abbildung 4.61 und Abbildung 4.62 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt gegen null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.60 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Eine Überschreitung der Nennspannung von 110% führt zur Anregung der Schutzfunktion und nach einer dauerhaften Überschreitung von 10 Sekunden erfolgt die Auslösung. Da die Auslösezeit länger ist als die Fehleraufnahmezeit des HIPASE-P, ist die Anregung am Beginn der Aufzeichnungen bereits aktiv.

In Abbildung 4.61 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Spannung über dem Nennwert liegt. Dann sieht man das Absinken der Spannung ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.62 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Strom über dem Nennwert liegt. Das wird daran liegen, dass die Spannung größer ist, aber die Last gleich bleibt.





Abbildung 4.61: 59G.1 Überspannung, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.62: 59G.1 Überspannung, gesamter Messbereich Strom

4.20 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 59G.2, Überspannung

In Abbildung 4.63 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 59G.2 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Erhöhung der Erregerspannung.



4.20.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.63: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe

4.20.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet.

4.20.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.20.4 Erkenntnis

Wird die Erregung erhöht, überschreitet der Spannungswert an den Generatorklemmen den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.64, Abbildung 4.65 und Abbildung 4.66 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt gegen null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.64 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Eine Überschreitung der Nennspannung von 150% führt zur Anregung der Schutzfunktion und nach einer dauerhaften Überschreitung von 0,08 Sekunden erfolgt die Auslösung. Da die Auslösezeit innerhalb der Fehleraufnahmezeit des HIPASE-P liegt, ist die Anregung in der Aufzeichnungen gut zu erkennen.

In Abbildung 4.65 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Spannung schnell ansteigt. Dann sieht man das Absinken der Spannung ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.66 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Strom schnell ansteigt. Das wird daran liegen, dass die Spannung schnell steigt, aber die Last gleich bleibt.





Abbildung 4.65: 59G.2 Überspannung, gesamter Messbereich



Abbildung 4.66: 59G.2 Überspannung, gesamter Messbereich Strom

4.21 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 64G95, Überstrom 1-phasig

In Abbildung 4.67 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 64G95 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.

4.21.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers



Abbildung 4.67: Variable Last als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet

4.21.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.9 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{\rm var} = 0, 1 \,\Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt. Die Impedanz der variablen Last wird an eine Phase des Verbrauchers gegen Erde zugeschaltet. Damit gibt der berechnete Wert für die Impedanz | $\underline{Z}_{\rm Load-new}$ | den Widerstand dieser Phase an.

$$\begin{aligned} |\underline{Z}_{\text{Load-new}}| &= |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| &= \\ &= |\frac{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) \cdot 0, 1\ \Omega}{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) + 0, 1\ \Omega}| &= 0, 1\ \Omega \end{aligned}$$
(4.9)

4.21.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.21.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 1-phasig gegen Erdpotenzial zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.68, Abbildung 4.69 und Abbildung 4.70 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.68 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Beim 1-phasigen Kurzschluss bricht die Spannung an Phase 1 auf fast 0 V ein, die Phase 2 und Phase 3 sinkt auf ca. 35% ab. Der maximale Kurzschlussstrom beträgt in Phase 1 das 23,2-Fache des Nennstromes und fließt über Erde zum Sternpunkt zurück. Dies ist in Abbildung 4.70 in Phase 1 der Strommessung 1 und und im Fehlerstrom über starre Erde zu sehen.

In Abbildung 4.70 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und den Dauerkurzschlussstrom ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird.



4.21 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 64G95, Überstrom 1-phasig



Abbildung 4.69: 64G95 1-phasiger Erdschluss, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.70: 64G95 1-phasiger Erdschluss, gesamter Messbereich Strom

4.22 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 78G, Außertrittfall

Die Schutzfunktion 78G ist eine Funktion, die nur in Verbindung mit einem Netzanschluss ihre Aufgabe erfüllen kann. Da der Laboraufbau als Inselbetrieb definiert wurde, sind keine Messdaten aufgenommen oder analysiert worden.

4.23 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 81G.o1, Überfrequenz

In Abbildung 4.71 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 81G.01 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Erhöhung der Drehzahl der Turbine.



4.23.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.71: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Drehzahl

4.23.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet.

4.23.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.23.4 Erkenntnis

Wird die Drehzahl der Turbine erhöht, überschreitet die Frequenz an den Generatorklemmen den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.72, Abbildung 4.73 und Abbildung 4.74 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.72 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Eine Überschreitung der Nennfrequenz von 2% führt zur Anregung der Schutzfunktion und nach einer dauerhaften Überschreitung von einer Sekunden erfolgt die Auslösung.

Die Frequenzänderung ist nur in Abbildung 4.72 durch den dargestellten berechneten Wert beim Anregen und beim Auslösen festzustellen. Ansonsten ist eine Frequenzänderung in keiner Abbildung rein optisch zu erkennen.



4.23 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 81G.01, Überfrequenz



Abbildung 4.73: 81G.o1 Überfrequenz, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.74: 81G.o1 Überfrequenz, gesamter Messbereich Strom

4.24 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 81G.u1, Unterfrequenz

In Abbildung 4.75 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 81G.u1 dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt durch die Verringerung der Drehzahl der Turbine.



4.24.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.75: Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Drehzahl

4.24.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet.

4.24.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.24.4 Erkenntnis

Wird die Drehzahl der Turbine verringert, unterschreitet die Frequenz an den Generatorklemmen den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator weg. Wie in Abbildung 4.76, Abbildung 4.77 und Abbildung 4.78 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 geöffnet. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen steigt auf das Leerlaufniveau.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.76 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Eine Unterschreitung der Nennfrequenz von 2% führt zur Anregung der Schutzfunktion und nach einer dauerhaften Überschreitung von einer Sekunden erfolgt die Auslösung.

Die Frequenzänderung ist nur in Abbildung 4.76 durch den dargestellten berechneten Wert beim Anregen und beim Auslösen festzustellen. Ansonsten ist eine Frequenzänderung in keiner Abbildung rein optisch zu erkennen.





Abbildung 4.77: 81G.u1 Unterfrequenz, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.78: 81G.u1 Unterfrequenz, gesamter Messbereich Spannung

4.25 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 87G, Generator-Differential, Erdschluss

In Abbildung 4.79 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 87G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.



4.25.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.79: Niedriger ohmscher Widerstand als Fehler zwischen Wicklungen und Gehäuse zugeschaltet

4.25.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

In der Gleichung 4.10 ist die Berechnung der Belastung nach dem Zuschalten der variablen Last $\underline{Z}_{var} = 0, 1 \Omega$ für die Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion dargestellt.

$$|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = |\frac{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) \cdot \underline{Z}_{\text{var}}}{(\underline{Z}_{\text{Load}} + \underline{Z}_{\text{TG}}) + \underline{Z}_{\text{var}}}| = = |\frac{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) \cdot 0, 1\ \Omega}{(903, 5\ \Omega + (92, 5 + j89, 01)\ \Omega) + 0, 1\ \Omega}| = 0, 1\ \Omega$$
(4.10)

4.25.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.25.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last 1-phasig zwischen Wicklung und Gehäuse zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator und die Erregung weg. Wie in Abbildung 4.80, Abbildung 4.81, Abbildung 4.82 und Abbildung 4.83 ersichtlich, folgt direkt die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet, der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt auf null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.80 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Die Generator Differentialfunktion besitzt keine Anregung, sondern nur eine Sofortaus-lösung.

Der Differenzstrom beträgt das 16,4-Fache des Nennstromes und fließt über Erde zum Sternpunkt des Generators.

In Abbildung 4.81 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird, bis der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.82 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man den subtransienten, den transienten und einen kleinen Teil des Dauerkurzschlussstroms in der Erdstrommessung ab der Stelle, an dem der der Fehler zugeschaltet wird. In der Abbildung 4.83 sind in Phase 1 der subtransiente, der transiente und ein kleiner Teil des Dauerkurzschlussstroms in der Strommessung 2 zu sehen. In Phase 2 und Phase 3 sind die Nennströme der Strommessung 2 zu erkennen.





Abbildung 4.81: 87G Differentialschutz Erdschluss, gesamter Messbereich Spannung


Abbildung 4.82: 87G Differentialschutz Erdschluss, gesamter Messbereich Strom



Abbildung 4.83: 87G Differentialschutz Erdschluss, gesamter Messbereich Strom

4.26 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 87G, Generator-Differential, Kurzschluss

In Abbildung 4.84 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 87G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den Leistungsschalter CB 4.



4.26.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.84: Niedriger ohmscher Widerstand als Fehler zwischen den Wicklungen zugeschaltet

4.26.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Die Zuschaltung der variablen Last $\ \underline{Z}_{\rm var}\ =\ 0,1$ Ω führt zur Unterschreitung des Parameterwertes der Schutzfunktion.

Daher muss die Last nicht berechnet werden, sie beträgt wie in Kapitel 4.25.2 genauso $|\underline{Z}_{\text{Load-new}}| = 0,1 \Omega.$

4.26.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.26.4 Erkenntnis

Wird die errechnete variable Last zwischen zwei Wicklungen zugeschaltet, so unterschreitet des System den Parameterwert der Schutzfunktion und schaltet den Generator und die Erregung weg. Wie in Abbildung 4.85, Abbildung 4.86, Abbildung 4.88 und Abbildung 4.87 ersichtlich, folgt direkt die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet, der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt auf null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.85 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Die Generator Differentialfunktion besitzt keine Anregung, sondern nur eine Sofortauslösung.

Der Differenzstrom beträgt ca. das 20,3-Fache des Nennstromes und wird nur von Strommessung 2 detektiert. Strommessung 1 misst nur den Nennstrom, weil der Fehler vor den Messwandlern erzeugt wird.

In Abbildung 4.86 ist der Verlauf der einzelnen Spannungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme die Nennspannung anliegt. Dann sieht man den Spannungseinbruch ab der Stelle, an der der Fehler zugeschaltet wird, bis der Fehler geklärt wird.

In Abbildung 4.87 ist der Verlauf der einzelnen Ströme dargestellt. Zu erkennen ist, dass am Beginn der Aufnahme der Nennstrom fließt. Dann sieht man das Absinken des Stromes ab der Stelle, an der der Fehler geklärt wird.

In der Abbildung 4.88 sind in Phase 1 der subtransiente, der transiente und ein kleiner Teil des Dauerkurzschlussstroms in der Strommessung 2 zu sehen. In Phase 2 ist der zurückfließende Strom von Phase 1 zu sehen. Phase 3 zeigt den Nennstrom bis zur Klärung des Fehlers. Die Einstellungen des Erregerstroms, der Erregerspannung und der Impedanz sind dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.



232



Abbildung 4.86: 87G Differentialschutz Kurzschluss, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.87: 87G Differentialschutz Kurzschluss, gesamter Messbereich Strom



Abbildung 4.88: 87G Differentialschutz Kurzschluss, links: Anregebereich, rechts: Auslösebereich bei Strommessung 2

4.27 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 94E, Mechanischer Fehler

In Abbildung 4.89 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 94G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den digitalen Eingang mit einem Schalter und einem 24 V-Gleichspannungsnetzteil.

4.27.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers



Abbildung 4.89: Fehlermeldung über digitalen Eingang zugeschaltet

4.27.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet.

4.27.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.27.4 Erkenntnis

Wird der digitale Eingang der Schutzfunktion 94E angesteuert, schaltet sich der Generator und die Erregung weg. Wie in Abbildung 4.90, Abbildung 4.91 und Abbildung 4.92 ersichtlich, folgt zuerst die Anregung und nach dem Ablaufen der Auslösezeit die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet, der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt auf null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.90 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Die Einstellungen des Erregerstroms, der Erregerspannung und der Impedanz sind dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.



238



Abbildung 4.91: 94E Erregerfehler, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.92: 94E Erregerfehler, gesamter Messbereich Strom

4.28 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion 94G, Mechanischer Fehler schnell

In Abbildung 4.93 ist der Schaltplan für die Messung der Schutzfunktion 94G dargestellt. Die Zuschaltung des Fehlers erfolgt über den digitalen Eingang mit einem Schalter und einem 24 V-Gleichspannungsnetzteil.



4.28.1 Schaltplan des Laboraufbaus mit Zuschaltung des Fehlers

Abbildung 4.93: Fehlermeldung über digitalen Eingang zugeschaltet

4.28.2 Berechnete Last nach dem Zuschalten

Keine Zuschaltung der variablen Last, daher keine Berechnung erforderlich. Der Leistungsschalter CB 4 bleibt offen. Es wird über den Leistungsschalter CB 3 die fixe Last bzw. Nennlast \underline{Z}_{Load} zugeschaltet.

4.28.3 Grafische Darstellungen des Fehlerverlaufs

In den nachfolgenden Abbildungen sind der zeitliche Strom-Spannungsverlauf, der Verlauf des Anrege- bzw. Auslösezeitpunktes und, falls durch die Schutzfunktion im Schutzgerät berechnet, der Impedanzverlauf im Fehlerfall dargestellt.

4.28.4 Erkenntnis

Wird der digitale Eingang der Schutzfunktion 94E angesteuert, schaltet sich der Generator und die Erregung weg. Wie in Abbildung 4.94, Abbildung 4.95 und Abbildung 4.96 ersichtlich, folgt direkt die Auslösung. Dabei wird der Leistungsschalter CB 1 und CB 2 geöffnet, der Stromfluss wird unterbrochen und die Spannung an den Generatorklemmen sinkt auf null.

Wie im Auslösebereich in Abbildung 4.94 rechts gut zu erkennen ist, gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Auslösesignal und der Unterbrechung des Stromflusses von einigen 10 Millisekunden. Das kann dadurch erklärt werden, dass beim realen TU Graz-Netzmodell Zeitverzögerungen durch die Übertragung des Auslösesignals aus der Software im Schutzgerät bis zum Leistungsschalter und durch den mechanischen Schaltvorgang beim Leistungsschalter auftreten.

Die Schutzfunktion 94G besitzt keine Anregung, sondern nur eine Sofortauslösung.

Die Einstellungen des Erregerstroms, der Erregerspannung und der Impedanz sind dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.





Abbildung 4.95: 94G Generatorfehler, gesamter Messbereich Spannung



Abbildung 4.96: 94G Generatorfehler, gesamter Messbereich Strom

4.29 Auswertung der Messergebnisse der Schutzfunktion Neutral End

Neutral End ist eine Funktion, die nur zum Ermitteln von Gegen- und Mitsystem benötigt wird. Es wurden keine Messdaten aufgenommen oder analysiert.

5 Erkenntnisse und Zusammenfassung

5.1 Erkenntnisse

Die nachfolgenden Erkenntnisse wurden während der Arbeit im Umgang mit dem Schutzgerät, des Netzmodells, dessen Komponenten und der im Labor zur Verfügung stehenden Ausrüstung erreicht.

Ein direkter Anschluss des Schutzgerätes ins System des Netzmodells ist auf Grund der niedrigen Spannung von 110 VAC möglich. Daher werden für die Einbindung keine Spannungswandler benötigt. Die Überlegung, dass man das Schutz-Rack auch für mehrere Spannungsebenen umschaltbar macht, musste aufgegeben werden, weil der Innenwiderstand des Spannungsmesseingangs zu niedrig war, um den Fehler in der Spannungsmessung ausreichend gering zu halten, wenn man einen Spannungsteiler einsetzen wollte. Es kam noch die Idee auf, mehrstufige umschaltbare Spannungswandler einzubauen. Jedoch würde die benötigte Anzahl dafür den räumlichen Rahmen übersteigen, weil solch ein Wandler viel mehr Platz als ein Spannungsteiler benötigt und zusätzliche Schalter für die Umschaltung untergebracht werden müssen. Dafür würde ein größerer Schaltschrank zum Einsatz kommen müssen, was auch einen finanziellen Mehraufwand bedeutet.

Der Einbau von Stromwandlern ist hingegen essenziell, weil es durch die Nennspannung von 110 VAC am Strommesseingang des Schutzgerätes zu Fehlmessungen durch die Elektronik gekommen ist. Bemerkbar wurden diese Fehlmessungen durch das nicht reproduzierbare Auslösen der Schutzfunktion 87G (Differentialschutz) im Inselbetrieb mit Nennlast. Durch die Analyse-Software, welche im HIPASE-P integriert ist, konnten immer wieder Stromspitzen von einigen 100 mA gemessen werden, welche mit steigernder Spannung am Stromeingang häufiger auftraten und höhere Spitzen zur Folge hatten. Für die Messelektronik stellte das Anlegen eines Potentials durch das direkte Anschließen der 3-Phasen-Systeme des Netzmodells an den Stromeingang ein Problem dar. Die Erkenntnis dazu hat einige Zeit und spezielle Prüfgeräte wie das OMICRON CMC benötigt und hätte ohne die rasche Hilfe des Herstellers noch länger gedauert.

Da der Generator des Laboraufbaus eine höhere Nennspannung an den Generatorklemmen bei Nennerregung produziert als die Nennspannung des TU Graz-Netzmodells ist, musste die Spannung an das Netzmodell angepasst werden. Weil dieser Generator dafür konzipiert wurde, ist eine Anpassung der Spannung problemlos möglich. Somit können die Komponenten vom Netzmodell und die Schutzgeräte mit dem Generator gekoppelt werden. Diese Werte wurden dann als neue Nennwerte für die Bestimmung der Schutzparameter herangezogen. Durch die Veränderung der Erregerspannung lässt sich die Nennspannung an den Klemmen des Generators vorgeben.

5.1 Erkenntnisse

Zum Generatorschutz in der Schutztechnik gibt es nur wenig aktuelle deutschsprachige Literatur, weshalb sehr viel auf die englischsprachige Literatur zurückgegriffen wurde. Als Orientierung für die grundlegende Berechnung und Bestimmung der Schutzparameter einer Schutzfunktion gab es nur in der englischsprachigen Literatur ein wegweisendes Dokument. Der IEEE Std C37.102[™]-2006[14] erklärt den Großteil der Schutzfunktionen für den Generatorschutz und wie man die Parameter dafür ermittelt. Ein paar Funktionen bzw. Parameter sind nur in der Betriebsanleitung des jeweiligen Schutzgerätes zu finden.

Um die berechneten Parameterwerte der Schutzfunktionen 21G, 40G und 78G besser verifizieren zu können, hat Herr Dipl.-Ing. Herbert Proschek vorgeschlagen, eine graphische Darstellung der Werte in einem Impedanz-Diagramm zu implementieren. Dadurch kann man die Parameterwerte auch ohne Prüfung am realen System auf ihre Richtigkeit testen. Tatsächlich konnte dadurch ein Vorzeichenfehler in einer der Formeln eruiert werden, weil sich der dargestellte Kreis nicht im erwarteten Bereich aufhielt. Außerdem wurde ersichtlich, dass zum Beispiel bei der Schutzfunktion 78G die vorgeschlagene Formel um den Realteil erweitert werden muss, weil durch den höheren Realteil des Transformators eine Verschiebung des Impedanzkreises nach rechts erfolgt. Ohne diese Berücksichtigung würde ein "Blinder", wie in Abbildung 5.1 zu sehen, außerhalb des Impedanzkreises landen. Das die "Blinder" innerhalb des Kreises sind, ist ein wichtiges Kriterium der Schlupfüberwachung. Diese Kriterien werden im Kapitel 3.4.5.1 genau erläutert.

Da bei diesem Laboraufbau der Lastwiderstand um ein Vielfaches höher sein muss als die Innenimpedanz des Generators, damit die Nennspannung von 110 VAC gehalten werden kann, errechnet sich auch ein viel höherer Parameterwert für die Schutzfunktion 40G. Für die Ermittlung der Parameter nach IEEE Std C37.102[™]-2006[14] verhalten sich die Impedanzwerte des Laboraufbaus für Stufe 1 und Stufe 2 verkehrt zu einem Realen System. Da die Impedanz der Last im Netzmodell um ein Vielfaches höher ist als die des Generators. Es wird für jede Stufe die Berechnungsvorgabe beibehalten, jedoch die höhere Auslösezeit angepasst. Im Gegensatz zur Standard-Definition laut IEEE Std C37.102[™]-2006[14] ist bei dieser Schutzfunktion mit diesem Laboraufbau die Zone 1 als äußerer und die Zone 2 als innerer Schutzbereich festgelegt. Das bedeutet, dass Zone 1 eine höhere Impedanz und auch eine längere Auslösezeit hat als Zone 2. Das gilt nur für diesen Aufbau im Labor und nicht für reale Komponenten aus einem Hochspannungssystem, dort ist die Impedanz der Last kleiner als die Impedanz des Generators.

Weil für diese Arbeit der Inselbetrieb mit rein ohmscher fixer und variabler Last definiert wurde, kann nicht das volle Spektrum dieses Schutzgerätes geprüft werden. Dieser Punkt wird im Kapitel 6 genauer beleuchtet.

Da in diesem Schutzgerät sehr viele Funktionen zum Einsatz kommen, werden zusätzlich 0,2 s bei redundanten Schutzfunktionen addiert, um im Fehlerfall keine gleichzeitige Auslösung dieser zu haben. Um welche Schutzfunktionen es sich dabei handelt, wird im Punkt Erkenntnis bei der betroffenen Messung im Kapitel 4 angeführt.

Die Schutzfunktionen 94E, Mechanischer Fehler, und 94G, Mechanischer Fehler schnell, aus dem Kapitel 3.3.19 und Kapitel 3.3.20 sind eigene Funktionen vom Hersteller Andritz und nur in der HIPASE-P-Applikationsbeschreibung[13] zu finden. Im IEEE Std C37.102^{\mathbb{M}}-2006[14] werden diese nicht erwähnt.



Abbildung 5.1: Darstellung der Einstellwerte im Impedanzkreis, 78G, ohne angepasste Formel

Fünf Schutzfunktionen können nicht verifiziert werden, die Gründe dafür werden im Kapitel 3.4 beschrieben.

5.2 Zusammenfassung

Die Parameter der Schutzfunktion lassen sich aus den Komponenten des Netzmodells der TU Graz ermitteln und repräsentieren die Verhältnisse in einem realen System. Nur beim Blocktransformator im Netzmodel ist das Verhältnis von Realteil zu Imaginärteil nicht einem realen Blocktransformator nachempfunden. Mit den ermittelten Parameterwerten aus dem Laboraufbau ist zu berücksichtigen, dass die Werte nicht eins zu eins für ein reales Netz übernommen werden können. Das liegt vor allem am Blocktransformator, dessen Winkel der Impedanz nicht einem Transformator im Mittel- und Hochspannungsnetz entspricht. Aber auch an einigen anderen Faktoren, welche in diesem Netzmodell nicht berücksichtigt werden können.

Dafür lässt sich mit dem Schutz-Rack hervorragend ein Grundverständnis für die Schutztechnik vermitteln. Es lassen sich die Parameter teilweise nachvollziehbar berechnen und mit den Einstellungen des Schutzgerätes bzw. der einzelnen Schutzfunktionen arbeiten diese wie erwartet. Ein paar Ermittlungsmethoden für bestimmte Parameter sind ohne genauere Erläuterung vom Hersteller bzw. im IEEE Std C37.102[™]-2006[14] festgelegt worden.

Mit den verschiedenen zugeschalteten Fehlern konnten die eingestellten Parameter verifiziert werden, was auch dem Kapitel 4 entnommen werden kann. Dort sind jede Schaltung und deren Werte im Verlauf über die Zeit graphisch dargestellt. Die Einbindung der Fehler bewirkte eine exakte Anregung bzw. Auslösung der Funktionen, jedoch wurden nur ohmsche Widerstände als Verbraucher und Fehler zugeschaltet.

Das Schutz-Rack, in Kombination mit dem TU Graz-Netzmodell, ist für den Lehr- und Schulungsbetrieb geeignet.

6 Ausblick

6.1 Allgemeines

Da sich diese Arbeit mit dem Erstellen eines Schutz-Racks für drei Schutzgeräte, dem Bestimmen der Parameter für das Andritz-Schutzgerät, dessen Konfigurieren und Inbetriebnahme im Inselbetrieb beschäftigt, gibt es hier noch viele Möglichkeiten für weiterführende Arbeiten.

Es gäbe die Optionen, im Inselbetrieb den Generator rein kapazitiv, induktiv oder ohmschinduktiv bzw. ohmsch-kapazitiv zu belasten und dabei das Anrege- und Auslöseverhalten der einzelnen Schutzfunktionen des Schutzgerätes zu analysieren.

Zu überprüfen wäre auch, ob mit einem Schutzgerät mehrere Objekte gleichzeitig ausreichend überwacht und geschützt werden können, weil die hohe Anzahl an analogen Messeingängen und die vielen digitalen Ein-Ausgänge eine solche Vorgehensweise erlauben würden. Zusätzlich kann noch die Analyse des Systems in Anbindung an das Netz erfolgen.

Im nächsten Schritt wäre es sinnvoll, einen größeren Netzbereich mit dem TU Graz-Netzmodell nachzustellen, indem zum Beispiel ein Erzeuger, ein Blocktransformator, Freileitungen oder Kabel, ein Netztransformator einer höheren Netzebene mit der dazugehörigen Netzeinspeisung sowie mehrere Verbraucher aufgebaut werden und dort das Schutz-Rack eingebunden wird. (Abbildung 6.1)

Zuvor müssen die Schutzparameter für die Schutzgeräte der Firmen Siemens und Schneider ermittelt und die Geräteparameter der jeweilig zu schützenden Anlagenteile bestimmt werden. Anschließend wäre eine Analyse der Schutzgeräte bei unterschiedlichen Belastungen an unterschiedlichen Stellen im Laboraufbau möglich.

Zusätzlich könnte mit diesem Laboraufbau die praktische Anwendung des Kommunikationsprotokolls IEC 61850 als Kommunikationsschnittstelle zwischen verschiedenen Schutzgeräteherstellern über Lichtwellenleiter untersucht werden.

Da in dieser Arbeit die Erregerspannung für den Generator fest vorgegeben wurde, wäre eine Untersuchung der zugeschalteten Fehler mit den Schutzgeräten und in den verschiedenen Betriebsmöglichkeiten mit Erregerstrom-Regelung interessant.

Das Schutz-Rack ist für den Lehr- und Schulungsbetrieb geeignet und in Kombination mit dem TU Graz-Netzmodell und mit dessen zugehörigen Komponenten sind Schulungen von Studenten ebenso wie von Fachpersonal möglich. Auch in der Forschung an neuen Schutztechnologien gäbe es großes Potential, weil man hier in einer sicheren Umgebung arbeiten kann und Fehler sich kaum auswirken. Mit dem Netzmodell können so verschiedene Szenarien durchgeführt werden und bei Fehlschaltungen hält sich dabei der finanzielle Schaden in Grenzen und es existiert kaum ein Unfallrisiko.

6.1 Allgemeines

Einige Vorschläge zur Ermittlung von Parametern im Kapitel 3.3 bzw. im Kapitel 3.4 sind in den Betriebsanleitungen bzw. im IEEE Std C37.102TM-2006[14] nicht ausreichend nachvollziehbar erläutert, dem könnte man nachgehen.





257

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

2.1	HIPASE-P MEDIUM GGP-002–/B1/F–R-P-TXK	8
2.2	SIPROTEC 7UT85	10
2.3	SIPROTEC 7MU85	10
2.4	Easergy MiCOM P634-749911M0-312-413-661-702-924-801	12
2.5	Vorderansicht des Schaltschranks, schematische Darstellung	15
2.6	Ansicht der Rückseite des Schaltschranks, schematische Darstellung	17
2.7	Schematischer Aufbau der Spannungsversorgung	19
2.8	Schematischer Aufbau der Netzwerkstruktur	20
2.9	Allgemeine Verschaltung der Sternpunkte zur Summenstrommessung	22
2.10	Darstellung schematischer Aufbau Andritz	23
2.11	Allgemeine Verschaltung der Sternpunkte zur Summenstrommessung	25
2.12	Darstellung schematischer Aufbau Siemens	26
2.13	Allgemeine Verschaltung der Sternpunkte zur Summenstrommessung	28
2.14	Darstellung schematischer Aufbau Schneider	29
9.1	II	25
3.1 2.0	Unisetzung des Schemas des Laboraufbaus	30
3.2	Schematischer Aufbau der Komponenten im Labor	30
3.3	Legende fur die Farbgebung in den nachfolgenden Tabellen	37
3.4	Legende fur die Farbgebung in den nachfolgenden Tabellen	45
3.5	pedanzdiagramm	50
3.6	Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 21G.1 und 21G.2 als	
	Kreise im Impedanzdiagramm	53
3.7	Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 40G.1 als Kreis im Im-	
	$pedanzdiagramm \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \$	63
3.8	Darstellung der Einstellwerte der Schutzfunktion 40G.1 und 40G.2 als	
	Kreise im Impedanzdiagramm	67
3.9	Differential Haltekennlinie	87
3.10	Darstellung der Einstellwerte im Impedanzkreis 78G	103
3.11	Kurzschluss angezeigt in der Visualisierung des HIPASE-P	107
3.12	Darstellung des Displays des HIPASE-P	108
4.1	Variable Last als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet	112
4.2	Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, links: Anregebe-	
4.2	reich, rechts: Auslösebereich	115
4.3	Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, gesamter Messbe-	110
	reich Spannung	116

4.4	Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, gesamter Messbereich Strom	117
4.5	Auswertung der Schutzfunktion 21G.1 Impedanzschutz, gesamter Messbe- reich Impedanz	118
16	Variable Last ale Febler ver dem Plealitransformator sussessbiltet	110
4.0	Augustung den Schutzfunktion 21C 2. Immedengschutz linke. Annorche	119
4.7	Auswertung der Schutzhunktion 21G.2 Impedanzschutz, innks: Anregebe-	100
1.0	reich, rechts: Auslösebereich	122
4.8	Auswertung der Schutzfunktion 21G.2 Impedanzschutz, gesamter Messbe-	100
1.0	reich Spannung	123
4.9	Auswertung der Schutzfunktion 21G.2 Impedanzschutz, gesamter Messbe-	10.4
1.10	reich Strom	124
4.10	Auswertung der Schutzfunktion 21G.2 Impedanzschutz, gesamter Messbe-	105
	reich Impedanz	125
4.11	Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe	126
4.12	Auswertung der Schutzfunktion 24G Ubererregung, links: Anregebereich,	
	rechts: Auslösebereich	128
4.13	Auswertung der Schutzfunktion 24G Ubererregung, gesamter Messbereich	
	Spannung	129
4.14	Auswertung der Schutzfunktion 24G Ubererregung, gesamter Messbereich	
	Strom	130
4.15	Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe	131
4.16	Auswertung der Schutzfunktion 27G.1 Unterspannung, links: Anregebe-	
	reich, rechts: Auslösebereich \ldots	133
4.17	Auswertung der Schutzfunktion 27G.1 Unterspannung, gesamter Messbe-	
	reich Spannung	134
4.18	Auswertung der Schutzfunktion 27G.1 Unterspannung, gesamter Messbe-	
	reich Strom	135
4.19	Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Spannungshöhe	136
4.20	Auswertung der Schutzfunktion 27G.2 Unterspannung, links: Anregebe-	
	reich, rechts: Auslösebereich \ldots	138
4.21	Auswertung der Schutzfunktion 27G.2 Unterspannung, gesamter Messbe-	
	reich Spannung	139
4.22	Auswertung der Schutzfunktion 27G.2 Unterspannung, gesamter Messbe-	
	reich Strom	140
4.23	Ohmscher Widerstand als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet	142
4.24	Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, links: Anregebe-	
	reich, rechts: Auslösebereich	145
4.25	Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, gesamter Messbe-	
	reich Spannung	146
4.26	Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, gesamter Messbe-	
	reich Strom	147
4.27	Auswertung der Schutzfunktion 40G.1 Untererregung, gesamter Messbe-	
	reich Impedanz	148
4.28	Ohmscher Widerstand als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet 149	
------	--	
4.29	Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, links: Anregebe-	
	reich, rechts: Auslösebereich \ldots	
4.30	Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, gesamter Messbe-	
	reich Spannung	
4.31	Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, gesamter Messbe-	
	reich Strom	
4.32	Auswertung der Schutzfunktion 40G.2 Untererregung, gesamter Messbe-	
	reich Impedanz	
4.33	Ohmscher Widerstand als Fehler nach dem Blocktransformator zugeschaltet 156 $$	
4.34	Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, links: Anregebereich, rechts:	
	Auslösebereich	
4.35	Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Span-	
	nung	
4.36	Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Strom 161	
4.37	Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler durch gegensinnige Turbinendrehrichtung 162	
4.38	Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, links: Anregebereich, rechts:	
	Auslösebereich	
4.39	Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Span-	
	nung	
4.40	Auswertung der Schutzfunktion 46G Schieflast, gesamter Messbereich Strom 166	
4.41	Ohmscher Widerstand als Fehler nach dem Blocktransformator zugeschaltet 167	
4.42	Auswertung der Schutzfunktion 49G 3-Phasenüberlast, links: Anregebe-	
	reich, rechts: Auslösebereich \ldots	
4.43	Auswertung der Schutzfunktion 49G 3-Phasenüberlast, gesamter Messbe-	
	reich Spannung \ldots	
4.44	Auswertung der Schutzfunktion 49G 3-Phasenüberlast, gesamter Messbe-	
	reich Strom	
4.45	Variable Last als Fehler nach dem Blocktransformator zugeschaltet $\ .$ 173	
4.46	Auswertung der Schutzfunktion 50BF Schaltversager, links: Anregebe-	
	reich, rechts: Auslösebereich \ldots	
4.47	Auswertung der Schutzfunktion 50BF Schaltversager, gesamter Messbe-	
	reich Spannung	
4.48	Auswertung der Schutzfunktion 50BF Schaltversager, gesamter Messbe-	
	reich Strom	
4.49	Ohmscher Widerstand als Fehler vor dem Blocktransformator zugeschaltet 180	
4.50	Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 1-phasiger Kurzschluss gegen N-	
	Leiter, links: An regebereich, rechts: Auslösebereich $\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ 182$	
4.51	Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 1-phasiger Kurzschluss gegen N-	
	Leiter, gesamter Messbereich Spannung	
4.52	Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 1-phasiger Kurzschluss gegen N-	
	Leiter, gesamter Messbereich Spannung	

4.53	Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 2-phasiger Kurzschluss, links: An- regebereich, rechts: Auslösebereich	187
4.54	Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 2-phasiger Kurzschluss, gesamter	
	Messbereich Spannung	188
4.55	Auswertung der Schutzfunktion 51G.1 2-phasiger Kurzschluss, gesamter Messbereich Strom	180
1 56	Auswortung der Schutzfunktion 51C 1.3 physicar Kurzschluss links: An	103
4.00	randoraich rechts: Auslösehereich	102
1 57	Auswertung der Schutzfunktion 51G 1.3 physiger Kurzschluss gesemter	152
1.01	Messhereich Spannung	103
4 58	Auswertung der Schutzfunktion 51G 1 3-phasiger Kurzschluss gesamter	150
1.00	Messhereich Strom	194
1 50	Nur five Last zugeschaltet Fehler über Spannungshöhe	104
4.60	59C 1 Überspannung links: Anregebereich rechts: Auslösebereich	108
4 61	59G 1 Überspannung, miks. Amegebereich, reents. Ausiosebereich	199
4.62	59G 1 Überspannung, gesamter Messbereich Strom	200
4 63	Nur five Last zugeschaltet Fehler über Spannungshöhe	200
4 64	59G 2 Überspannung links: Anregebereich rechts: Auslösebereich	201
4 65	59G.2 Überspannung, miks. Amegebereich, reents. Ausiosebereich	200
4 66	59G 2 Überspannung, gesamter Messbereich Strom	201
4 67	Variable Last als Febler vor dem Blocktransformator zugeschaltet	206
4.68	64G95 1-phasiger Erdschluss, links: Anregebereich, rechts: Auslösebereich	208
4.69	64G95 1-phasiger Erdschluss, gesamter Messbereich Spannung	209
4.70	64G95 1-phasiger Erdschluss, gesamter Messbereich Strom	210
4.71	Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Drehzahl	212
4.72	81G.o1 Überfrequenz, links: Anregebereich, rechts: Auslösebereich	214
4.73	81G.o1 Überfrequenz, gesamter Messbereich Spannung	215
4.74	81G.o1 Überfrequenz, gesamter Messbereich Strom	216
4.75	Nur fixe Last zugeschaltet, Fehler über Drehzahl	217
4.76	81G.u1 Unterfrequenz, links: Anregebereich, rechts: Auslösebereich	219
4.77	81G.u1 Unterfrequenz, gesamter Messbereich Spannung	220
4.78	81G.u1 Unterfrequenz, gesamter Messbereich Spannung	221
4.79	Niedriger ohmscher Widerstand als Fehler zwischen Wicklungen und Ge-	
	häuse zugeschaltet	222
4.80	87G Differentialschutz Erdschluss, links: Anregebereich, rechts: Auslöse-	
	bereich	225
4.81	87G Differential schutz Erdschluss, gesamter Messbereich Spannung $\ .\ .\ .$	226
4.82	87G Differential schutz Erdschluss, gesamter Messbereich Strom $\ .\ .\ .$.	227
4.83	87G Differential schutz Erdschluss, gesamter Messbereich Strom $\ .\ .\ .$.	228
4.84	Niedriger ohmscher Widerstand als Fehler zwischen den Wicklungen zu-	
	geschaltet	229
4.85	87G Differentialschutz Kurzschluss, links: Anregebereich, rechts: Auslöse-	
	bereich	232

4.86	87G Differentialschutz Kurzschluss, gesamter Messbereich Spannung 233		
4.87	87G Differentialschutz Kurzschluss, gesamter Messbereich Strom 234		
4.88	87G Differentialschutz Kurzschluss, links: Anregebereich, rechts: Auslöse-		
	bereich bei Strommessung 2		
4.89	Fehlermeldung über digitalen Eingang zugeschaltet		
4.90	94E Erregerfehler, links: Anregebereich, rechts: Auslösebereich		
4.91	94E Erregerfehler, gesamter Messbereich Spannung		
4.92	94E Erregerfehler, gesamter Messbereich Strom		
4.93	Fehlermeldung über digitalen Eingang zugeschaltet		
4.94	94G Generatorfehler, links: An regebereich, rechts: Auslösebereich $\ .\ .\ .\ .$ 243		
4.95	94G Generatorfehler, gesamter Messbereich Spannung		
4.96	94G Generatorfehler, gesamter Messbereich Strom		
5.1	Darstellung der Einstellwerte im Impedanzkreis, 78G, ohne angepasste Formel		
6.1	Konzeptvorschlag für die Verwendung des Schutz-Racks im Labor 257		

8 Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

3.1	Nenndaten und Parameter des Generators	38
3.2	Parameter der Last	39
3.3	Parameter des Blocktransformators	40
3.4	Parameter der Schutzfunktion 21G.1, Unterimpedanzschutz 3-phasig	49
3.5	Parameter der Schutzfunktion 21G.2, Unterimpedanzschutz 3-phasig	52
3.6	Parameter der Schutzfunktion 24G, Übererregungsschutz	55
3.7	Parameter der Schutzfunktion 27G.1, Unterspannungsschutz	57
3.8	Parameter der Schutzfunktion 27G.2, Unterspannungsschutz	59
3.9	Parameter der Schutzfunktion 40G.1, Untererregungsschutz	62
3.10	Parameter der Schutzfunktion 40G.2, Untererregungsschutz	66
3.11	Parameter der Schutzfunktion 46G, Schieflast	69
3.12	Parameter der Schutzfunktion 49G, Überlast 3-phasig	71
3.13	Parameter der Schutzfunktion 50BF, Schaltversager	73
3.14	Parameter der Schutzfunktion 51G.1, Überstromschutz 3-phasig	75
3.15	Parameter der Schutzfunktion 59G.1, Überspannungsschutz 3-phasig	77
3.16	Parameter der Schutzfunktion 59G.2, Überspannungsschutz 3-phasig	79
3.17	Parameter der Schutzfunktion 64G95, Überstromschutz 1-phasig	81
3.18	Parameter der Schutzfunktion 81G.o1, Überfrequenzschutz	83
3.19	Parameter der Schutzfunktion 81G.u1, Unterfrequenzschutz	85
3.20	Parameter der Schutzfunktion 87G, Generator Differentialschutz 3-phasig	89
3.21	Parameter der Schutzfunktion 94E, Mechanischer Fehler, Ausfall der Er-	
	regung	90
3.22	Parameter der Schutzfunktion 94G, Mechanischer Fehler, schnelle Auslö-	
	sung durch Störung am Generator	91
3.23	Parameter der Schutzfunktion 32R, Wirkleistung Untererfassung 3-phasig	94
3.24	Parameter der Schutzfunktion 50G/27, Unerwünschte Zuschaltung	96
3.25	Parameter der Schutzfunktion 51G.2, Überstromschutz 3-phasig	98
3.26	Parameter der Schutzfunktion 78G, Außertrittfallschutz	102
3.27	Parameter der Schutzfunktion Neutral End	105

9 Literaturverzeichnis

Literatur

- Johann Bacher. Electrical Machines for Power Engineering (431.120) Synchronous Machine. Techn. Ber. TU Graz Institut f
 ür Elektrische Antriebstechnik und Maschinen Inffeldgasse 18/1A-8010 Graz, 2022.
- [2] Power System Relaying Committee. *IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators, Second Edition.* Techn. Ber. Institute of Electrical und Electronics Engineers, Inc. IEEE 3 Park Avenue New York, USA, 2011.
- Schneider Electric. Easergy MiCOM P634 Transformator-Differentialschutzeinrichtung P634/DE M/R-b5-B Version P634 -312 -413/414 -661 Betriebsanleitung. Techn. Ber. Schneider Electric 35 rue Joseph Monier 92506 Rueil-Malmaison FRANCE, 2019.
- [4] OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik. ÖVE E 8101 Elektrische Niederspannungsanlagen. Techn. Ber. OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Eschenbachgasse 9, 1010 Wien, 2019.
- [5] Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler. Schutz und Versorgungs-sicherheit elektrischer Energiesysteme - LU, Begleitende Unterlagen zum Labor. Techn. Ber. TU Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze Inffeldgasse 18/I 8010 Graz Austria, 2021.
- [6] Lucas-Nülle GmbH. Bedienungsanleitung Leistungsschalter-ModulCO3301-5P. Techn. Ber. Lucas Nülle, Siemensstraße 250170 Kerpen-Sindorf, 2011.
- [7] Lucas-Nülle GmbH. Bedienungsanleitung Servo Maschinenprüfstand CO2663-6U/CO2663-6V/CO3636-6V/CO3636-6W. Techn. Ber. Lucas Nülle, Siemensstraße 250170 Kerpen-Sindorf, 2011.
- [8] Lucas-Nülle GmbH. Bedienungsanleitung Transformator Trainer CO3636-7A. Techn. Ber. Lucas Nülle, Siemensstraße 250170 Kerpen-Sindorf, 2011.
- [9] Lucas-Nülle GmbH. Datenblatt SE2662-5Q. Techn. Ber. Lucas Nülle, Siemensstraße 250170 Kerpen-Sindorf, 2011.
- [10] Böhm H. ELIN DRS Schutzfunktion ME311 Out of Step (MHO) Funktionsbeschreibung. Techn. Ber. VA TECH SAT GmbH und Co, PRT Penzingerstr. 76, A-1141 WIEN ÖSTERREICH, 2004.
- [11] ANDRITZ HYDRO. HIPASE Datenblätter Beschreibung der Systemkomponenten Version. Revision 1. 07. Techn. Ber. ANDRITZ HYDRO GmbH Automation Product Management Eibesbrunnergasse 20 1120 Wien Österreich, 2020.
- [12] ANDRITZ HYDRO. HIPASE Systembeschreibung Engineering Tool und Gerät V1.40. Techn. Ber. ANDRITZ HYDRO GmbH Automation Product Management Eibesbrunnergasse 20 1120 Wien Österreich, 2020.

- [13] ANDRITZ HYDRO. HIPASE-P Schutzanwendung Applikationsbeschreibung Version 1.40. Techn. Ber. ANDRITZ HYDRO GmbH Automation Product Management Eibesbrunnergasse 20 1120 Wien Österreich, 2020.
- [14] IEEE Power und Energy Society. IEEE Guide for AC Generator Protection Std C37.102[™]-2006 (Revision of IEEE Std C37.102-1995). Techn. Ber. Institute of Electrical und Electronics Engineers, Inc. IEEE 3 Park Avenue New York, USA, 2007.
- [15] IEEE Power und Energy Society. IEEE Standard for Cylindrical-Rotor50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above IEEE Std C50.13[™]-2014 (Revision of IEEE Std C50.13-2005). Techn. Ber. Institute of Electrical und Electronics Engineers, Inc. IEEE 3 Park Avenue New York, USA, 2014.
- [16] IEEE Power und Energy Society. IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations, IEEE Std C37.2[™]-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996). Techn. Ber. Institute of Electrical und Electronics Engineers, Inc. IEEE 3 Park Avenue New York, USA, 2008.
- [17] Siemens. SIPROTEC 5 Beschreibung Hardware ab V8.80. Techn. Ber. Siemens AG, 2021.
- Siemens. SIPROTEC 5 Merging Unit 6MU85V8.60 and higher Manual. Techn. Ber. Siemens AG, 2021.
- [19] Siemens. SIPROTEC 5, Transformatordifferentialschutz, 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87 ab V8.80 Handbuch. Techn. Ber. Siemens AG, 2021.
- [20] Gerhard Ziegler. Digitaler Differenzialschutz Grundlagen und Anwendung. Techn. Ber. Siemens, 2004.

10 Anhang

10.1 Geräteliste für Laboraufbau

Stück	Gerätebeschreibung
1	HIPASE-P-MEDIUM GGP-002–/B1/F–R-P-TXK
1	Generator Lucas Mülle SE2662-5Q
1	Servo Maschinenprüfstand Lucas Mülle CO2663-6U
1	Servo Motor Lucas Mülle CO2663-6U
1	Stromversorgungsgerät Rohde & Schwarz 0-100 VDC Typ NGRE $100/14$
4	Leistungsschalter-Modul Lucas Mülle CO3301-5P
3	Messwandler-Modul Lucas Mülle
1	Widerstandslast Lucas Mülle SE2662-8P
1	Transformator Lucas Mülle CO3636-7A
3	Einstellbarer Widerstand 0-1020 Ω 1,05 A REO Solingen
1	Multimeter Fluke 175
1	Multimeter GOSSEN METRAWATT MetraHit 29S
1	Multimeter GOSSEN METRAWATT MetraHit 30M
2	Multimeter GOSSEN METRAWATT MetraHit Energy
1	MOBILER EXPERIMENTIERSTAND, ST7200-4C, ALUPROFIL, 3-ETAGIG, 6 STECKDOSEN, 1250X700X1995MM
1	Laptop Microsoft Surface Pro 3
1	24 VDC-Labornetzteil RSPRO RPE-3323

10.2 MATLAB CODE

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 1 of 17
```

```
%main program to import and analyze data from protectiv divice Andritz%%%%%
clear
%% current path
current_path = pwd;
%% target path
data_path = [pwd, '\Messdaten von Schutzfunktion\'];
   %% read folders
folder_list = dir(data_path);
%% Set global values
% set rated voltage
U n = 110;
U_ph_amp = U_n/sqrt(3)*sqrt(2);
set rated current per phase and amplitude
I_n = 0.072;
\ensuremath{\$} set rated impedance per phase and amplitude
Z_ph = U_n/sqrt(3)/I_n;
% set additional colors
yell_cust = [1 0.7 0.05];
gr_cust = [0.47 \ 0.65 \ 0.19];
vi_cust = [0.5 0.18 0.56];
% line white for plots
lw_all = 1;
lw_{fig245} = 1.5;
%% run program
for i = 6%1:length(folder_list)
folder_list_name = folder_list(i).name;
&_____
                                ----%
%% find out 3 or 4 rows per subplots are needed and set value
if contains(folder_list_name,'87')
    sub_plot_CM2 = 1;
else
sub_plot_CM2 = 0;
end
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 2 of 17
```

```
%% read filename from all data
\% list all data with file extension .tsv
data_list = ls([data_path folder_list_name '\' '*.tsv']);
%% import data from folder
data = importTSVfile([data_path folder_list_name '\' data_list(1,:)]);
                      %
8---
%% select required data
% determine length of data
data_length = length(data);
% set total range
begin = 51;
ends = data_length;
total range = (begin:ends);
% date of timestring
date_time = data(total_range,1);
% delete 'Â'
date_time = erase(date_time, 'Â');
% relative time
rel_time = str2double(data(total_range,2))./1e3;
% search for current from CM1
row_CM1 = find(contains(data(21,:),'CM1L'));
% currents L1,L2,L3 of CM1 (current measurement 1) in pu
CM1{1,1} = data([18,20,21],row CM1(1));
CM1{1,2} = str2double(data(total_range,row_CM1(1)))./le6./I_ph_amp;
CM1{2,1} = data([18,20,21],row_CM1(2));
CM1{2,2} = str2double(data(total_range,row_CM1(2)))./1e6./I_ph_amp;
CM1{3,1} = data([18,20,21],row_CM1(3));
CM1{3,2} = str2double(data(total_range,row_CM1(3)))./1e6./I_ph_amp;
% search for voltage from VM1
row_VM1 = find(contains(data(21,:),'U'));
% voltage L1,L2,L3 of VM1 (voltage measurement 1) in pu
VM1{1,1} = data([18,20,21],row_VM1(1));
VM1{1,2} = str2double(data(total_range,row_VM1(1)))./1e6./U_ph_amp;
VM1{2,1} = data([18,20,21],row_VM1(2));
VM1{2,2} = str2double(data(total_range,row_VM1(2)))./1e6./U_ph_amp;
VM1{3,1} = data([18,20,21],row_VM1(3));
VM1{3,2} = str2double(data(total_range,row_VM1(3)))./le6./U_ph_amp;
% search for current from CM2
if sub plot CM2 == 1
   row_CM2 = find(contains(data(21,:),'CM2L'));
    % currents L1,L2,L3 of CM2 (current measurement 2) in pu
```

3 of 17

```
CM2{1,1} = data([18,20,21],row_CM2(1));
    CM2{1,2} = str2double(data(total_range,row_CM2(1)))./1e6./I_ph_amp;
    CM2\{2,1\} = data([18,20,21],row_CM2(2));
    CM2{2,2} = str2double(data(total_range,row_CM2(2)))./1e6./I_ph_amp;
    CM2{3,1} = data([18,20,21],row_CM2(3));
    CM2{3,2} = str2double(data(total_range,row_CM2(3)))./le6./I_ph_amp;
end
% search for current from ground current 1 (GC1) in pu
row_GC1 = find(contains(data(21,:),'Ground current 1'));
% ground current 1 (GC1)
GC1{1,1} = data([18,20,21],row GC1(1));
GC1{1,2} = str2double(data(total_range,row_GC1(1)))./1e6./I_ph_amp;
% search for current from Hz
row_Hz = find(contains(data(21,:),'Frequency'));
% frequency in Hz
fe{1,1} = data([18,20,21],row_Hz);
fe{1,2} = round(str2double(data(total_range,row_Hz))./1e6,2);
% search for number of function
numb_func = extractBefore(folder_list_name(1,:),' ');
% all heads of data
heads_data = data(21,1:150);
% find row of function
row_func = find(contains(heads_data,numb_func));
% find row of functionvalues
row_func_val = find(contains(heads_data,[numb_func, ' / Imped']));
% is row_func_val empty
if length(row_func_val)== 1
    print_Z = 2;
elseif length(row_func_val) == 3
    print_Z = 1;
else
   print_Z = 0;
end
% impedance of L1, L2, L3
Z{1,1} = data([18,20,21],row_func_val);
Z{1,2} = round(str2double(data(total_range,row_func_val))./1e6,2);
 error no heads of data
if isempty(row_func)
    error('No functionnumber found, maybe not the right designation.')
end
%% limits of range
\ensuremath{\$} set limit of start and operate range divided into measuring points
range lim = 400;
```

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ...

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 4 of 17
```

```
% –
% calculate the impedance curve over time for all 3 phases in pu
Z_pu = Z\{1,2\}./Z_ph;
                                 8-----
%% start of protectiv function
% check for 'Start' in string of data
if contains(data(21,row_func(1,1)),'Start')
    start{1,1} = data(21, row_func(1,1));
start{1,2} = str2double(data(total_range,row_func(1,1)));
    % search for time of begin start and range of start
    begin start = find(start{2});
    if begin_start(1) <= range_lim</pre>
    range_start = begin_start(1):begin_start(1)+range_lim;
elseif begin_start(1) >= length(rel_time)-range_lim
        range_start = begin_start(1) -range_lim:begin_start(1);
    else
       range_start = begin_start(1)-range_lim:begin_start(1)+range_lim;
    end
    % plot in figure 2 the start part
    plot_fig2_srt = 1;
    % two coulum of figure 2
    subplot_coulum = 2;
    % change sequence of subplotnumbers
    sub_num = 0;
else
    start{1,1} = "Keine Anregung, nur Auslösung";
    start{1,2} = zeros([1,ends-begin+1]);
    row_func(1,2) = row_func(1,1);
    % plot not in figure 2 the start part
    plot fig2 srt = 0;
     one coulum of figure 2
    subplot_coulum = 1;
    % change sequence of subplotnumbers
sub_num = 1;
end
                                              -----%
8---
%% operate of protectiv function
% check for 'Operate' in string of data
oper{1,2} = str2double(data(total_range,row_func(1,2)));
     Search for time of operate and range of operate
    begin_opr = find(oper{2});
    % time range of operate
    if begin_opr(1) <= range_lim</pre>
    range_opr = begin_opr(1):begin_opr(1)+range_lim;
elseif begin_opr(1) >= length(rel_time)-range_lim
        range_opr = begin_opr(1) -range_lim:begin_opr(1);
    else
        range_opr = begin_opr(1)-range_lim:begin_opr(1)+range_lim;
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 5 of 17
```

```
8
end
8-----
                                            -----%
%% find frequency on start and operate point
if plot_fig2_srt == 1
fe_start = fe{1,2}(begin_start(1));
end
fe_opr = fe{1,2}(begin_opr(1));
%------%
%% find min & max of y-axis overall
yminC1 = round(min([CM1{1,2},CM1{2,2},CM1{3,2}],[],'all'),1);
ymaxC1 = round(max([CM1{1,2},CM1{2,2},CM1{3,2}],[],'all'),1);
ymaxC1_abs = round(max([ymaxC1 abs(yminC1)],[],'all'),1);
if sub_plot_CM2 == 1
yminC2 = round(min([CM2{1,2},CM2{2,2},CM2{3,2}],[],'all'),1);
ymaxC2 = round(max([CM2{1,2},CM2{2,2},CM2{3,2}],[],'all'),1);
ymaxC2_abs = round(max([ymaxC2 abs(yminC2)],[],'all'),1);
end
yminGC1 = round(min(GC1{1,2},[],'all'),1);
ymaxGC1 = round(max(GC1{1,2},[],'all'),1);
\% if the ground current is less than 1, same min/max as CM1
if yminGC1 <1 && ymaxGC1 < 1
   yminGC1 = yminC1;
ymaxGC1 = ymaxC1;
end
ymaxGC1 abs = round(max([ymaxGC1 abs(yminGC1)],[],'all'),1);
yminV = round(min([VM1{1,2},VM1{2,2},VM1{3,2}],[],'all'),1);
ymaxV = round(max([VM1{1,2},VM1{2,2},VM1{3,2}],[],'all'),1);
ymaxV_abs = round(max([ymaxV abs(yminV)],[],'all'),1);
yminZ = round(min([-1.5 1.5]),1);
ymaxZ = round(max([-1.5 1.5]),1);
$_____$
%% set ticks
x_ticks_fig = round(rel_time(1),1):0.2:round(rel_time(end),1);
if plot_fig2_srt == 1
    % calculate the distance between the ticks
    x_ticks_fig2s_dis = round((range_start(end)-range_start(1))/20000,2);
    x_ticks_fig2s = round(rel_time(range_start(1)),2):x_ticks_fig2s_dis:...
    round(rel_time(range_start(end)),2);
end
% calculate the distance between the ticks
x_ticks_fig2o_dis = round((range_opr(end)-range_opr(1))/20000,2);
x_ticks_fig2o = round(rel_time(range_opr(1)),2):x_ticks_fig2o_dis:...
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 6 of 17
```

```
round(rel time(range opr(end)),2);
% calculate the distance between the ticks
y_ticksC1_dis = ymaxC1_abs/5;
   calculate the ticks
y_ticksC1_m = [flip(0:-y_ticksC1_dis:-ymaxC1_abs)...
   y_ticksC1_dis:y_ticksC1_dis:ymaxC1_abs];
% add one tick more on the beginning and end
y_ticksC1 = [y_ticksC1_m(1)-y_ticksC1_dis, y_ticksC1_m,...
            y_ticksC1_m(end)+y_ticksC1_dis];
if sub_plot_CM2 == 1
    % calculate the distance between the ticks
    y_ticksC2_dis = ymaxC2_abs/5;
      calculate the ticks
    y_ticksC2_m = [flip(0:-y_ticksC2_dis:-ymaxC2_abs)...
        y_ticksC2_dis:y_ticksC2_dis:ymaxC2_abs];
    % add one tick more on the beginning and end
y_ticksC2 = [y_ticksC2_m(1)-y_ticksC2_dis, y_ticksC2_m,...
            y_ticksC2_m(end)+y_ticksC2_dis];
end
% calculate the distance between the ticks
y_ticksGC1_dis = ymaxGC1_abs/5;
   calculate the ticks
y_ticksGC1_m = [flip(0:-y_ticksGC1_dis:-ymaxGC1_abs)...
   y_ticksGC1_dis:y_ticksGC1_dis:ymaxGC1_abs];
% add one tick more on the beginning and end
y_ticksGC1 = [y_ticksGC1_m(1)-y_ticksGC1_dis, y_ticksGC1_m,...
            y_ticksGC1_m(end)+y_ticksGC1_dis];
% calculate the distance between the ticks
y_ticksV_dis = ymaxV_abs/5;
 calculate the ticks
y_ticksV_m = [flip(0:-y_ticksV_dis:round(yminV,2))...
    y_ticksV_dis:y_ticksV_dis:round(ymaxV,2)];
% add one tick more on the beginning and end
y_ticksV = [y_ticksV_m(1)-y_ticksV_dis y_ticksV_m...
   y_ticksV_m(end)+y_ticksV_dis];
% calculate the y-ticks for impedance
y_ticksZ = [yminZ:0.25:ymaxZ];
                                                                      ____%
%% create label for subplot 1
label7 = strcat(extractBefore(start{1,1}(1),' '), ' / Anregung');
label8 = strcat(extractBefore(oper{1,1}(1),' '), ' / Auslösung');
%-----
                                         %% change size of figure for 4 subplots
if sub_plot_CM2 == 1
   add size = 300;
else
    add_size = 0;
end
```

10.2 MATLAB CODE

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 7 of 17

```
8-
%% plot data in figure 1
fig1 = figure('name',[folder_list_name,' fig1'],'numbertitle','off');
set(fig1,'Position',[0 0 1200 1000])
subplot(4,1,1);
plot(rel_time,start{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
hold or
plot(rel_time,oper{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color','r')
ylim([-0.1 1.1])
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
xticks(x_ticks_fig)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Logikwert')
legend(label7,label8,'Location','northwest')
title('Anregung/Auslösung')
hold off
subplot(4,1,2);
plot(rel_time,VM1{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
hold on
plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
grid on
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksV(1) y_ticksV(end)])
xticks (x_ticks_fig)
yticks(y_ticksV)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Spanning in p.u.')
legend('U_{L1}','Location','northeast')
title('Spannung Phase 1')
hold off
subplot(4,1,3);
plot(rel_time,VM1{2,2},'LineWidth', lw_all, 'Color', gr_cust)
hold on
grid on
plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksV(1) y_ticksV(end)])
ylim(ty_ticksv(i) y_ticksv(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks(y_ticksV)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Spannung in p.u.')
legend('U_(L2)','Location','northeast')
title('Spannung Phase 2')
hold off
subplot(4,1,4);
plot(rel_time,VM1{3,2},'LineWidth', lw_all, 'Color', vi_cust)
hold on
arid on
```

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 8 of 17

```
plot(rel_time, zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksV(1) y_ticksV(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks(y_ticksV)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Spanning in p.u.')
legend('U_{L3}','Location','northeast')
title('Spannung Phase 3')
hold off
8 ----
                       %% plot data in figure 2
fig2 = figure('name',[folder_list_name,' fig2'],'numbertitle','off');
set(fig2,'Position',[1000 100 (1000*subplot_coulum) (600+sub_plot_CM2*300)])
if sub_plot_CM2 == 1
    % change the width of the textbox of the annotation funktion
    annotwidth = 0.09+(sub_plot_CM2*0.1);
    % change the y position of the textbox in the figure
   annotposy = 0.63+(sub_plot_CM2*0.08);
    % change the x position of the textbox in the figure
   annotposx = 0.815-(sub_plot_CM2*0.1);
    % change the height of the textbox in the figure
   annotheight = 0.045-(sub_plot_CM2*0.015);
elseif subplot_coulum == 2
    % change the width of the textbox of the annotation funktion
   annotwidth = 0.09;
    \% change the y position of the textbox in the figure
   annotposy = 0.63;
    % change the x position of the textbox in the figure
   annotposx = 0.815;
    % change the height of the textbox in the figure
   annotheight = 0.045;
else
% change the width of the textbox of the annotation funktion
annotwidth = 0.18;
% change the y position of the textbox in the figure
annotposy = 0.63;
% change the x position of the textbox in the figure
annotposx = 0.725;
\% change the height of the textbox in the figure annotheight = 0.045;
end
if plot_fig2_srt == 1
    subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,1);
    plot(rel_time(range_start),start{1,2}(range_start),'LineWidth',...
       lw_fig245, 'Color', yell_cust)
   hold on
    % zero line
   plot(rel_time(range_start), zeros(size(rel_time(range_start))), 'k')
    xlim([x_ticks_fig2s(1) x_ticks_fig2s(end)])
    vlim([-0.1 1.1])
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 9 of 17
```

```
xticks (x ticks fig2s)
    yticks([0 1])
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Logikwert')
    legend(label7,'Location','southeast')
    title('Anregung')
    hold off
end
subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,2-sub_num);
plot(rel_time(range_opr),oper{1,2}(range_opr),'LineWidth',lw_fig245,...
     'Color', 'r')
hold on
plot(rel_time(range_opr),zeros(size(rel_time(range_opr))),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig2o(1) x_ticks_fig2o(end)])
ylim([-0.1 1.1])
xticks(x_ticks_fig2o)
yticks([0 1])
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Logikwert')
legend(label8,'Location','southeast')
title('Auslösung')
hold off
if plot_fig2_srt == 1
    annotation('textbox', [0.13 annotposy annotwidth annotheight],...
         'String',['f bei Auslösung = ' num2str(fe_start,'%.2f') ' Hz'])
    subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,3);
    plot(rel_time(range_start),VM1{1,2}(range_start),'LineWidth',...
        lw_fig245,..
          'Color', yell cust)
    hold on
     grid on
    plot(rel_time(range_start),VM1{2,2}(range_start),'LineWidth',...
         lw_fig245,'Color',gr_cust)
    plot(rel_time(range_start),VM1{3,2}(range_start),'LineWidth',...
lw_fig245,'Color',vi_cust)
     % zero line
    plot(rel_time(range_start), zeros(size(rel_time(range_start))), 'k')
     xlim([x_ticks_fig2s(1) x_ticks_fig2s(end)])
    ylim([y_ticksV(1) y_ticksV(end)])
    ylik(ty_ctoks((i) y_ctoks(chd)))
xticks(x_ticks_fig2s)
yticks(y_ticksV)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Spannung in p.u.')
legend('U_(L1)','U_(L2)','U_(L3)','Location','southeast')
i'left('')
    title('Spannung aller 3 Phasen')
    hold off
end
annotation('textbox', [annotposx annotposy annotwidth annotheight],...
     'String',['f bei Auslösung = ' num2str(fe_opr,'%.2f') ' Hz'])
```

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 10 of 17

```
subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,4-sub_num*2);
plot(rel_time(range_opr), VM1{1,2}(range_opr), 'LineWidth', lw_fig245,...
     'Color', yell_cust)
hold on
grid on
plot(rel_time(range_opr),VM1{2,2}(range_opr),'LineWidth',lw_fig245,...
     Color', gr cust)
plot(rel_time(range_opr),VM1{3,2}(range_opr),'LineWidth',lw_fig245,...
     Color', vi_cust)
plot(rel_time(range_opr),zeros(size(rel_time(range_opr))),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig2o(1) x_ticks_fig2o(end)])
ylim([y_ticksV(1) y_ticksV(end)])
xticks(x_ticks_fig2o)
yticks(y_ticksV)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Spannung in p.u.')
legend('U_{L1}','U_{L2}','U_{L3}','Location','southeast')
title('Spannung aller 3 Phasen')
hold off
if plot_fig2_srt == 1
    subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,5);
    plot(rel_time(range_start), CM1{1,2}(range_start), 'LineWidth',...
        lw_fig245, 'Color', yell_cust)
    hold on
    grid on
    plot(rel_time(range_start),CM1{2,2}(range_start),'LineWidth',...
        lw_fig245, 'Color', gr_cust)
    plot(rel_time(range_start),CM1{3,2}(range_start),'LineWidth',...
        lw_fig245, 'Color', vi_cust)
    % zero line
    plot(rel_time(range_start), zeros(size(rel_time(range_start))), 'k')
    xlim([x_ticks_fig2s(1) x_ticks_fig2s(end)])
    ylim([y_ticksC1(1) y_ticksC1(end)])
    xticks (x_ticks_fig2s)
    yticks(y_ticksC1)
    slabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L1}','I_{L2}','I_{L3}','Location','southeast')
title('Strom aller 3 Phasen an Strommessung 1')
    hold off
end
subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,6-sub_num*3);
plot(rel_time(range_opr), CM1{1,2}(range_opr), 'LineWidth', lw_fig245,...
     Color', yell_cust)
hold on
grid on
plot(rel_time(range_opr),CM1{2,2}(range_opr),'LineWidth',lw_fig245,...
     'Color',gr_cust)
plot(rel time(range opr), CM1{3,2}(range opr), 'LineWidth', lw fig245,...
     'Color', vi cust)
plot(rel_time(range_opr), zeros(size(rel_time(range_opr))), 'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig2o(1) x_ticks_fig2o(end)])
ylim([y_ticksC1(1) y_ticksC1(end)])
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 11 of 17
```

```
xticks(x ticks fig2o)
yticks (y_ticksC1)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L1}','I_{L2}','I_{L3}','Location','southeast')
title('Strom aller 3 Phasen an Strommessung 1')
hold off
if sub_plot_CM2 == 1
    if plot_fig2_srt == 1
         subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,7);
        plot(rel_time(range_start),CM2{1,2}(range_start),'LineWidth',...
lw_fig245,'Color',yell_cust)
         hold on
         grid on
         plot(rel_time(range_start),CM2{2,2}(range_start),'LineWidth',...
             lw_fig245,'Color',gr_cust)
         plot(rel_time(range_start), CM2{3,2}(range_start), 'LineWidth',...
             lw_fig245, 'Color', vi_cust)
         % zero line
         plot(rel_time(range_start), zeros(size(rel_time(range_start))), 'k')
         xlim([x_ticks_fig2s(1) x_ticks_fig2s(end)])
         ylim([y_ticksC2(1) y_ticksC2(end)])
        xticks(x_ticks_fig2s)
yticks(y_ticksC2)
         xlabel('Zeit in s')
         ylabel('Strom in p.u.')
         legend('I_{L1}','I_{L2}','I_{L3}','Location','southeast')
         title('Strom aller 3 Phasen an Strommessung 2')
        hold off
    end
6
    subplot(3+sub_plot_CM2,subplot_coulum,8-sub_num*4);
    plot(rel_time(range_opr), CM2{1,2}(range_opr), 'LineWidth', lw_fig245,...
          Color',yell_cust)
    hold on
    grid on
    plot(rel_time(range_opr),CM2{2,2}(range_opr),'LineWidth',lw_fig245,...
           Color',gr_cust)
    plot(rel_time(range_opr), CM2{3,2}(range_opr), 'LineWidth', lw_fig245,...
         'Color', vi_cust)
    % zero line
    plot(rel_time(range_opr), zeros(size(rel_time(range_opr))), 'k')
    xlim([x_ticks_fig2o(1) x_ticks_fig2o(end)])
    ylim([y_ticksC2(1) y_ticksC2(end)])
    xticks(x_ticks_fig2o)
    yticks(y_ticksC2)
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L1}','I_{L2}','I_{L3}','Location','southeast')
title('Strom aller 3 Phasen an Strommessung 2')
    hold off
end
```

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 12 of 17

```
%% plot data in figure 3
fig3 = figure('name',[folder_list_name,' fig3'],'numbertitle','off');
set(fig3,'Position',[0 0 1200 1250])
subplot(5,1,1);
plot(rel_time,start{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
hold on
plot(rel_time,oper{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color','r')
ylim([-0.1 1.1])
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks([0 1])
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Logikwert')
legend(label7,label8,'Location','northwest')
title('Anregung/Auslösung')
hold off
subplot(5,1,2);
plot(rel_time,CM1{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
hold on
grid on
plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksC1(1) y_ticksC1(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks(y_ticksCl)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L1}','Location','northeast')
title('Strom Phase 1 an Strommessung 1')
hold off
subplot(5,1,3);
plot(rel_time,CM1{2,2},'LineWidth',lw_all,'Color',gr_cust)
hold on
grid on
plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksC1(1) y_ticksC1(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks(y_ticksC1)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L2}','Location','northeast')
title('Strom Phase 2 an Strommessung 1')
hold off
subplot(5,1,4);
plot(rel time,CM1{3,2},'LineWidth', lw all, 'Color', vi cust)
hold on
grid on
plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 13 of 17
```

```
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksC1(1) y_ticksC1(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks(y_ticksC1)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L3}','Location','northeast')
title('Strom Phase 3 an Strommessung 1')
hold off
subplot(5,1,5);
plot(rel_time,GC1{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color','g')
hold on
grid on
plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
ylim([y_ticksGC1(1) y_ticksGC1(end)])
xticks(x_ticks_fig)
yticks(y_ticksGC1)
xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{E}','Location','northeast')
title('Fehlerstrom über starre Erdung des Sternpunktes')
hold off
8-
%% plot data in figure 4
if print_Z == 1
    fig4 = figure('name',[folder_list_name,' fig4'],'numbertitle','off');
set(fig4,'Position',[0 0 1200 1000])
    subplot(4,1,1);
    plot(rel_time,start{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
    hold on
    plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
    ylim([-0.1 1.1])
    plot(rel_time,oper{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color','r')
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    xticks (x_ticks_fig)
    yticks([0 1])
    xlabel('Zeit in s')
    ylabel('Logikwert')
    legend(label7,label8,'Location','northwest')
    title('Anregung/Auslösung')
    hold off
    subplot(4,1,2);
    plot(rel_time,Z_pu(:,1),'LineWidth',lw_fig245,'Color',yell_cust)
    hold on
    plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
    grid d
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
```

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 14 of 17

```
ylim([yminZ ymaxZ])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks (y_ticksZ)
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Betrag der Impedanz in p.u.')
legend('|Z|_{L1}','Location','northeast')
title('Impedanzbetrag von Phase 1 ')
    hold off
    subplot(4,1,3);
    plot(rel_time,Z_pu(:,2),'LineWidth',lw_fig245,'Color',gr_cust)
    hold on
    plot(rel_time, zeros(size(rel_time)), 'k') % zero line
    grid on
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    ylim([yminZ ymaxZ])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks(y_ticksZ)
xlabel('Zeit in s')
    ylabel('Betrag der Impedanz in p.u.')
legend('|Z|_{L2}','Location','northeast')
    title('Impedanzbetrag von Phase 2 ')
    hold off
    subplot(4,1,4);
    plot(rel_time,Z_pu(:,3),'LineWidth',lw_fig245,'Color',vi_cust)
    hold on
    plot(rel_time, zeros(size(rel_time)), 'k') % zero line
    grid on
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    ylim([yminZ ymaxZ])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks(y_ticksZ)
xlabel('Zeit in s')
    ylabel('Betrag der Impedanz in p.u.')
legend('|Z|_{L3}','Location','northeast')
    title('Impedanzbetrag von Phase 3 ')
    hold off
end
                           ______
°----
%% plot data in figure 5
if print_Z == 2
    fig5 = figure('name',[folder_list_name,' fig5'],'numbertitle','off');
    set(fig5,'Position',[0 0 1200 500])
    subplot(2,1,1);
    plot(rel_time,start{1,2},'LineWidth',lw_fig245,'Color',yell_cust)
    hold on
    plot(rel_time,oper{1,2},'LineWidth',lw_fig245,'Color','r')
    ylim([-0.1 1.1])
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 15 of 17
```

```
plot(rel_time, zeros(size(rel_time)), 'k') % zero line
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks([0 1])
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Logikwert')
    legend(label7,label8,'Location','northwest')
    title('Anregung/Auslösung')
    hold off
    subplot(2,1,2);
    plot(rel_time,Z_pu(:,1),'LineWidth',lw_fig245,'Color',yell_cust)
    hold on
    plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
    grid on
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    ylim([yminZ ymaxZ])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks(y_ticksZ)
xlabel('Zeit in s')
    ylabel('Betrag der Impedanz in p.u.')
    legend('|Z|','Location','northeast')
    title('Impedanzbetrag')
    hold off
end
                                          -----%
8 -
%% plot data in figure 6
if sub_plot_CM2 == 1
    fig6 = figure('name', [folder list name,' fig6'], 'numbertitle', 'off');
    set(fig6, 'Position', [0 0 1200 2000])
    subplot(4,1,1);
    plot(rel_time,start{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
    hold on
    plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
    ylim([-0.1 1.1])
    plot(rel_time,oper{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color','r')
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    xticks(x_ticks_fig)
yticks([0 1])
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Logikwert')
    legend(label7,label8,'Location','northwest')
    title('Anregung/Auslösung')
    hold off
    subplot(4,1,2);
    plot(rel_time,CM2{1,2},'LineWidth',lw_all,'Color',yell_cust)
    hold on
    plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
```

12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 16 of 17

```
grid on
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    ylim([y_ticksC2(1) y_ticksC2(end)])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks(y_ticksC2)
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{Ll}','Location','northeast')
    title('Strom Phase 1 an Strommessung 2 ')
    hold off
    subplot(4,1,3);
    plot(rel_time,CM2{2,2},'LineWidth',lw_all,'Color',gr_cust)
    hold on
    plot(rel_time, zeros(size(rel_time)), 'k') % zero line
    grid on
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    ylim([y_ticksC2(1) y_ticksC2(end)])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks(y_ticksC2)
xlabel('Zeit in s')
    ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L2}','Location','northeast')
    title('Strom Phase 2 an Strommessung 2 ')
    hold off
    subplot(4,1,4);
    plot(rel_time,CM2{3,2},'LineWidth',lw_all,'Color',vi_cust)
    hold on
    plot(rel_time,zeros(size(rel_time)),'k') % zero line
    grid on
    xlim([x_ticks_fig(1) x_ticks_fig(end)])
    ylim([y_ticksC2(1) y_ticksC2(end)])
    xticks(x_ticks_fig)
    yticks(y_ticksC2)
    xlabel('Zeit in s')
ylabel('Strom in p.u.')
legend('I_{L3}','Location','northeast')
title('Strom Phase 3 an Strommessung 2 ')
    hold off
end
                                                           -----%
s - -
               _____
%% save the plot in the rigth folder as PDF
exportgraphics(fig1,[data_path,'Charts','\PDF Charts\',...
    [folder_list_name,' fig1'],'.pdf'])%emf
2
exportgraphics(fig2,[data_path,'Charts','\PDF Charts\',...
[folder_list_name,' fig2'],'.pdf'])%emf
exportgraphics(fig3,[data path,'Charts','\PDF Charts\',...
    [folder_list_name,' fig3'],'.pdf'])%emf
if print_Z == 1
```

```
12.09.22 14:52 C:\Users\I\Nextcloud\Shared\Projekt ... 17 of 17
exportgraphics(fig4,[data_path,'Charts','\PDF Charts\',...
[folder_list_name,' fig4'],'.pdf'])%emf
end
if print_Z == 2
exportgraphics(fig5,[data_path,'Charts','\PDF Charts\',...
[folder_list_name,' fig5'],'.pdf'])%emf
end
if sub_plot_CM2 == 1
    exportgraphics(fig6,[data_path,'Charts','\PDF Charts\',...
[folder_list_name,' fig6'],'.pdf'])%emf
end
8-----
                                               -----%
%% print measuremente text on display
disp(['Save chart: ', folder_list_name]);
close(fig1)
close(fig2)
close(fig3)
if print_Z == 1
close(fig4)
end
if print_Z == 2
close(fig5)
end
if sub plot CM2 == 1
    close(fig6)
end
if i == length(folder_list)
    disp('create and save complete')
end
end
8
```